



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ  
ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

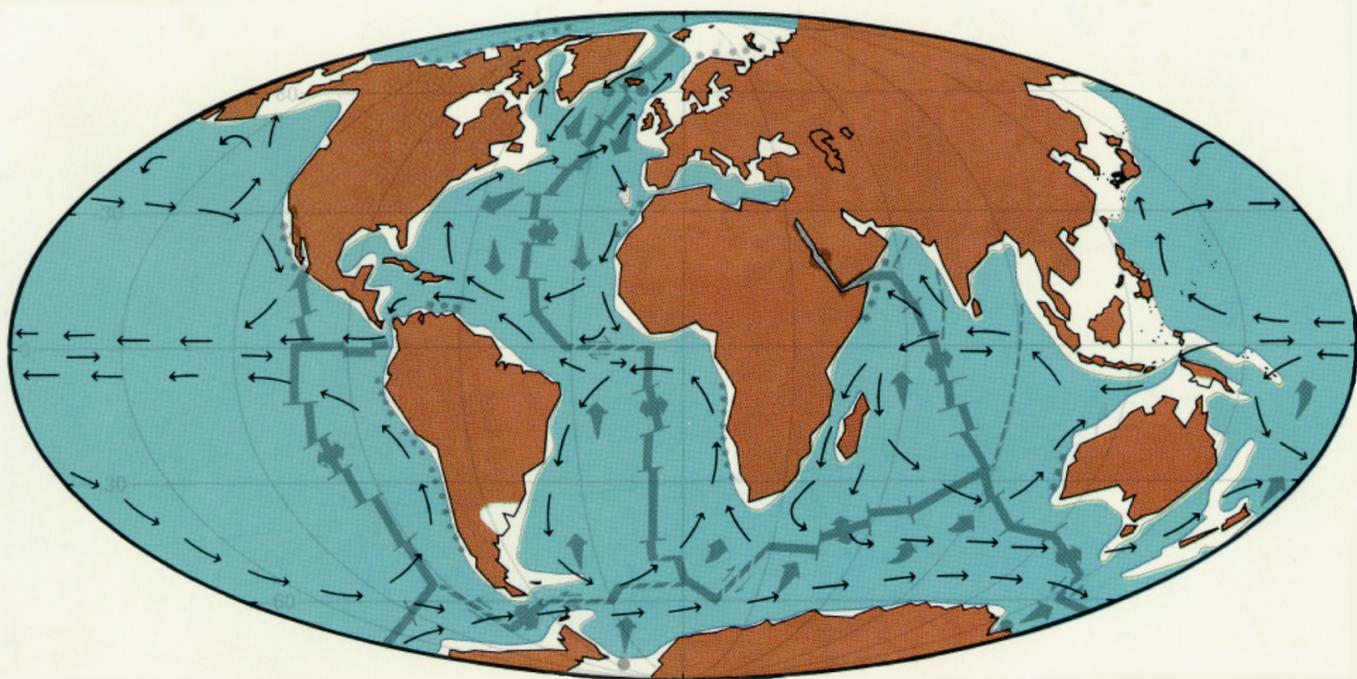


Материалы  
XXVI  
Международной  
научной  
конференции  
(Школы)  
по морской  
геологии

Москва  
2025

# ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Том III



*РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН*

**ГЕОЛОГИЯ  
МОРЕЙ И ОКЕАНОВ**

**Материалы XXVI Международной научной конференции  
(Школы) по морской геологии**

**Москва, 17–21 ноября 2025 г.**

**Том III**

**GEOLOGY  
OF SEAS AND OCEANS**

**Proceedings of XXVI International Conference on Marine  
Geology**

**Moscow, November 17–21, 2025**

**Volume III**

Москва / Moscow  
ИО РАН / IO RAS  
2025

ББК 26.221  
Г35  
УДК 551.35

**Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – М.: ИО РАН, 2025. – 282 с.**

В настоящем издании представлены доклады морских геологов, геофизиков, геохимиков и других специалистов на XXVI Международной научной конференции (Школе) по морской геологии, опубликованные в четырех томах.

В томе III рассмотрены проблемы, связанные с биогеохимическими процессами в морях и океанах, а также исследований по проблеме «Система Белого моря».

*ISBN 978-5-6051054-9-7*

*DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-9-7>*

Доклады опубликованы в авторской редакции.  
Ответственный редактор к.г.-м.н. Н.В. Политова

Рецензенты

академик Л.И. Лобковский, д.г.-м.н. Л.Л. Демина, д.г.-м.н. И.А.  
Немировская, к.г.-м.н. М.Д. Кравчишина

**Geology of seas and oceans: Proceedings of XXVI International Conference on Marine Geology. Vol. III. – Moscow: IO RAS, 2025. – 282 pp.**

The reports of marine geologists, geophysicists, geochemists and other specialists of marine science at XXVI International Conference on Marine Geology in Moscow are published in four volumes.

Volume III includes reports devoted to the problems of biogeochemical processes in the seas and oceans and also of the investigations on problem “White Sea system”.

ISBN 978-5-6051054-9-7  
ББК 26.221

© ИО РАН 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Биохимические процессы в морях и океане</b>	
<i>Бекеша И.А., Саттарова В.В., Алаторцев А.В., Усягина И.С.</i> Аккумуляция тяжелых металлов в донных отложениях глубоководных районов северо-западной части Тихого океана	17
<i>Беляев Н.А.</i> Биогеохимический цикл органического углерода в Карском море	19
<i>Брюханов А.Л., Саввичев А.С., Кравчишина М.Д.</i> Микробные сообщества морских донных отложений Западно-Арктического шельфа России и их роль в ключевых биогеохимических процессах	24
<i>Будько Д.Ф., Стародымова Д.П.</i> О факторах распределения микроэлементов в поверхностном слое донных осадков Карского моря	29
<i>Виноградова Е.Л.</i> Особенности поступления метана в подповерхностные воды и его распространения над Сибирскими окраинами Северного Ледовитого океана	34
<i>Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Федоров Ю.А., Усова Е.В., Беляев А.И., Дмитрик Л.Ю., Анпилова Е.Л., Верещагин М.А.</i> Результаты факторного анализа по выявлению основных показателей и процессов, контролирующих распределение метана в водной толще Цимлянского водохранилища	39
<i>Гринько А.А., Гершелис Е.В., Спивак Э.А., Дударев О.В., Семилетов И.П.</i> Органическое вещество взвешенного надосадочного материала Карского моря	45
<i>Гуров К.И., Медведев Е.В., Мукосеев И.Н., Орехова Н.А.</i> Характеристики поровых вод донных отложений на участке Южного берега Крыма	50
<i>Гурова Ю.С., Гуров К.И., Медведев Е.В., Мукосеев И.Н., Орехова Н.А.</i> Параметры карбонатной системы донных отложений Севастопольской бухты	55
<i>Демина Л.Л., Галкин С.В.</i> Седиментологическая роль донной фауны в Восточно-Сибирском и Лаптевых морях	59

<i>Демина Л.Л., Галкин С.В., Коченкова А.И.</i>	64
микроэлементном составе инвазивного краба-стригуна <i>Chionoecetes opilio</i> в Карском море	
<i>Дубинин А.В., Римская-Корсакова М.Н., Дубинина Е.О., Демидова Т.П., Семилова Л.С., Бережная Е.Д., Золотина Е.Н., Очередник О.А.</i>	69
Аноксигенное окисление сероводорода в Черном море	
<i>Дударев О.В., Чаркин А.Н., Черных Д.В., Рубан А.С., Пипко И.И., Пугач С.П., Мотора А.П., Астахов А.С., Семилетов И.П., Gustafsson Ö.</i>	74
Литологические и биогеохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря	
<i>Заварзина А.Г., Беляев Н.А.</i>	77
Неучтенные наземные источники биомаркеров лигнина в биосфере	
<i>Кокрятская Н.М., Лосюк Г.Н., Попов С.С., Титова К.В.</i>	80
Антропогенная изоляция морских заливов. Озера Большие и Малые Хрусломены, Кандалакшский залив Белого моря	
<i>Красиков В.А., Чаркин А.Н., Леусов А.Э.</i>	85
Трассирование субмаринной разгрузки подземных вод и прибрежного апвеллинга в заливе Посъета с помощью естественных изотопов радия (осень 2024)	
<i>Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Кривоногов С.К.</i>	88
Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений минерального озера Учум (Красноярский край)	
<i>Леусов А.Э., Чаркин А.Н.</i>	93
Влияние разгрузки субмаринных подземных вод на эстуарную биоту губы Буор-Хая (море Лаптевых)	
<i>Леусов А.Э., Чаркин А.Н., Пипко И.И., Пугач С.П., Дударев О.В., Красиков В.А.</i>	96
Оценка роли субмаринного подземного стока в формировании гидрохимического режима вод Анадырского залива Берингова моря (по результатам экспедиции НИС «Академик Опарин» осенью 2023 г.)	
<i>Лопатников Е.А., Саттарова В.В., Рябчук Д.В.,</i>	98

<i>Григорьев А.Г., Сергеев А.Ю., Ким Д.В.</i> Содержание и особенности распределения редкоземельных элементов в донных отложениях северо-западного шельфа Берингова моря	
<i>Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М.</i> Соединения восстановленной серы в отделившихся от Белого моря озерах	103
<i>Лукьянова О.Н., Артамонова К.В., Варварова А.О., Зубаревич В.Л., Иванов В.В., Клювиткин А.А., Мурзакова Ю.В., Торгунова Н.И., Чульцова А.Л., Щука А.С.</i> Гидролого-гидрохимические особенности вод Баренцева моря в летний и осенний период	108
<i>Мальцев А.Е., Кириченко И.С., Кривоногов С.К.</i> Геохимия донных отложений литоральной зоны озера Иссык-Куль (Кыргызстан)	112
<i>Мигдисова И.А., Демина Л.Л., Клювиткин А.А., Стародымова Д.П., Лукьянова О.Н.</i> Микроэлементы в зоопланктоне Норвежско-Гренландского бассейна	117
<i>Моисеева Ю.А.</i> Особенности микроэлементного состава устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Черного моря	122
<i>Моргунова И.П., Литвиненко И.В., Куршева А.В.</i> Углеводородные молекулярные маркеры, как индикаторы разгрузки газовых флюидов в четвертичных отложениях впадины Дерюгина (Охотское море)	125
<i>Мосеев Д.С., Мискевич И.В., Березина М.О.</i> Тяжелые металлы в водорослях у берегов южной части острова Вайгач	130
<i>Мошаров С.А., Боровкова К.А., Сашова О.А., Корсак М.Н.</i> Продукционная активность фитопланктона в шельфово-склоновой зоне моря Лаптевых в летний период	134
<i>Пипко И.И., Пугач С.П., Андреев А.Г., Мотора А.П., Дударев О.В.</i> Параметры карбонатной системы и потоки CO <sub>2</sub> между водой и атмосферой на западном шельфе Чукотского моря перед началом ледостава	138
<i>Поливанова Т.К., Гершелис Е.В., Якушев Е.В.</i> Влияние	143

стока малой реки на геохимию осадков в прибрежной зоне на примере р. Ашамба (Кавказское побережье Черного моря)	
<i>Пургина Д.В., Моисеева Ю.А., Гершелис Е.В.</i> Мышьяк и фосфор в поровых водах донных отложений эстуарных областей (на примере рек Енисей и Пясины)	148
<i>Пушкарева Е.М.</i> Первые данные о содержании гуминовых веществ в верхнем слое донных осадков Карского моря	153
<i>Римская-Корсакова М.Н., Дубинин А.В.</i> Растворенные и лабильные взвешенные формы Мо, W и V воде Черного моря	157
<i>Саввичев А.С., Русанов И.И., Засько Д.Н., Пименов Н.В.</i> Автотрофная продукция и гетеротрофная бактериальная активность в морях Восточной Арктики (морья Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Берингов пролив)	161
<i>Сашова О.А., Мошаров С.А., Боровкова К.А.</i> Изменчивость продукционной активности фитопланктона в районах взаимодействия вод разного генезиса в западной и северной частях Карского моря	165
<i>Севастьянов В.С., Федулова В.Ю., Душенко Н.В., Воропаев С.А., Наймушин С.Г., Долгоносков А.А.</i> Газонасыщенность осадочного чехла депрессий Карского моря	169
<i>Семенов П.Б., Мальшев С.А., Корнева Я. Ю., Шатрова Е.В., Киль А.О., Гусев Е.А., Фильчук К.В.</i> Растворенное органическое вещество в водной толще и поровой воде донных осадков высокоширотной Арктики (по материалам дрейфа СП 41)	173
<i>Силкин В.А., Паутова Л.А., Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А.</i> Биологический углеродный насос высокой Арктики в летний период	176
<i>Сорокина В.В., Кулыгин В.В., Алешина Е.Г.</i> Оценка параметров карбонатной системы вод на участке нижний Дон – восточная часть Таганрогского залива в 2024 г.	181
<i>Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Дорохова Е.В.</i> Связь	186

содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков Карского моря	
<i>Торопов А.С., Служковский З.И., Строганов Н.А., Денисов Д.Б., Адамская П.Н.</i> Ранний диагенез в стратифицированном водоеме: поведение редких и рассеянных элементов в градиенте окислительно- восстановительных условий (на примере оз. Могильное, о-в Кильдин, Мурманская область)	190
<i>Федоров Ю.А., Талпа Б.В., Гарькуша Д.Н., Доценко Н.В.</i> Гидротроилит в донных отложениях водных экосистем	195
<i>Федулов В.Ю., Беляев Н.А.</i> Некоторые особенности распределения взвешенного органического углерода в Карском море (анализ многолетних данных)	200
<i>Федулов В.Ю., Беляев Н.А.</i> Особенности распределения растворенного органического углерода в Карском море (анализ многолетних данных)	202
<i>Федулов В.Ю., Стрельцова Е.А., Пушкарева Е.М., Беляев Н.А.</i> Методы определения содержания некоторых компонентов в органическом веществе во взвешенной и растворенной формах	205
<i>Швед В.А., Кравчишина М.Д., Егоров А.В., Калгин В.Ю., Ключанцева А.П., Новигатский А.Н., Кловиткин А.А., Стрелецкая И.Д.</i> Концентрации метана в водной толще Западно-Арктического шельфа Евразии по результатам 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш»	209

#### **Система Белого моря, 4-D исследования**

<i>Брусиловский Ю.В., Балувев А.С.</i> Модели глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря по результатам комплексного анализа геофизических данных	215
<i>Вяткин Е.Д., Энтин А.Л., Репкина Т.Ю.</i> Моделирование гляциоизостатических деформаций в программе SELEN: возможности и ограничения (на примере котловины и берегов Белого моря)	220

<i>Демиденко Н.А., Гордеев В.В., Коченкова А.И.</i>	225
Современный гидрологический режим и динамика наносов в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя	
<i>Иванова Д.А., Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Беленкова В.В.</i>	230
Фитопланктон губы Кислой – водоема, отделенного от Баренцева моря дамбой приливной электростанции	
<i>Иглин С.М., Коробов В.Б.</i>	234
Динамические характеристики волнения, уровня и течений в юго-восточной части Двинского залива Белого моря летом и осенью 2022 года (по данным инструментальных наблюдений)	
<i>Коченкова А.И., Стародымова Д.П., Лохов А.С., Гордеев В.В.</i>	239
Динамика твердого стока р. Северной Двины в период весеннего половодья в 2015–2025 гг.	
<i>Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Жильцова А.А., Иванова Д.А., Лабунская Е.А., Миндолина Ю.В., Пацаева С.В., Плотников А.О., Соколовская Ю.Г.</i>	244
Функциональное зонирование экосистемы прибрежного меромиктического озера Трехцветное	
<i>Мискевич И.В., Калашников А.В.</i>	250
Статистическая характеристика содержания мышьяка и металлов в донных отложениях центральной части устьевоего взморья реки Северная Двина	
<i>Мосеев Д.С., Лецев А.В., Мискевич И.В.</i>	255
Особенности накопления наносов на литорали юго-восточного побережья Онежского залива Белого моря	
<i>Репкина Т.Ю., Леонтьев П.А., Кублицкий Ю.А., Крехов А.К., Орлов А.В., Левкова Д.Н., Вяткин Е.Д., Яковлева А.П.</i>	259
Морфодинамика берегов Белого моря в позднеледниковье и голоцене: Соловецкий архипелаг и о. Жижгин	
<i>Савенко А.В.</i>	264
Современная тенденция изменения характера распределения растворенного минерального фосфора в устьях малых рек Кандалакшского залива Белого моря	
<i>Стародымова Д.П., Котова Е.И., Коченкова А.И.</i>	269
Атмосферное поступление вещества на водосбор	

Северной Двины как источник тяжелых металлов в речном стоке	
<i>Чернов И.А., Толстиков А.В.</i> Численная модель сверхмалого водоема: бухты Благополучия в Белом море	273
<i>Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Саввичев А.С., Новигатский А.Н.</i> Накопление тяжелых металлов кустистыми эпифитными лишайниками Кенозерского национального парка (Архангельская область)	277

## CONTENTS

<b>Biogeochemical processes in the seas and oceans</b>	
<i>Bekesha I.A., Sattarova V.V., Alatortsev A.V., Usyagina I.S.</i> Accumulation of heavy metals in bottom sediments of deep-sea areas of the northwestern Pacific Ocean	17
<i>Belyaev N.A.</i> Organic carbon biogeochemical cycle in the Kara Sea	19
<i>Bryukhanov A.L., Savvichev A.S., Kravchishina M.D.</i> Microbial communities of marine bottom sediments of the Western Arctic shelf of Russia and their role in key biogeochemical processes	24
<i>Budko D.F., Starodymova D.P.</i> The factors of trace elements distribution in the surface layer of bottom sediments of the Kara Sea.	29
<i>Vinogradova E.L.</i> Features of the entering and distribution of methane in subsurface waters over the Siberian Arctic continental margin	34
<i>Gar'kusha D.N., Kosolapova A.E., Fedorov Yu.A., Usova E.V., Belyaev A.I., Dmitrik L.Yu., Anpilova E.L., Vereshchagin M.A.</i> The results of a factor analysis to identify the main indicators and processes controlling the distribution of methane in the water column of the Tsimlyansk reservoir	39
<i>Grinko A.A., Gershelis E.V., Spivak E.A., Dudarev O.V., Semiletov I.P.</i> Organic matter in suspended sediments from the Kara Sea	45
<i>Gurov K.I., Medvedev E.V., Mukoseev I.N., Orekhova N.A.</i> Characteristics of bottom sediments pore waters in the area of the Southern coast of Crimea	50
<i>Gurova Y.S., Gurov K.I., Medvedev E.V., Mukoseev I.N., Orekhova N.A.</i> Characteristics of the bottom sediments carbonate system in the Sevastopol bay	55
<i>Demina L.L., Galkin S.V.</i> Sedimentological role of modern benthic fauna in the East Siberian and Laptev Seas	59
<i>Demina L.L., Galkin S.V., Kochenkova A.I.</i> On the trace element composition of the invasive snow crab <i>Chionoecetes</i>	64

<i>opilio</i> in the Kara Sea	
<i>Dubinina A.V., Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinina E.O., Demidova T.P., Semilova L.S., Berezhnaya E.D., Zologina E.N., Ocherednik O.A.</i> Anoxygenic oxidation of hydrogen sulfide in the Black Sea	69
<i>Dudarev O.V., Charkin A.N., Chernykh D.V., Ruban A.S., Pipko I.I., Pugach S.P., Motora A.P., Astakhov A.S., Semiletov I.P., Gustafsson O.</i> Lithological and biogeochemical characteristics of the East Siberian Sea bottom sediments	74
<i>Zavarzina A.G., Belyaev N.A.</i> Unaccounted-for terrestrial sources of lignin biomarkers in the biosphere	77
<i>Kokryatskaya N.M., Losyuk G.N., Popov S.S., Titova K.V.</i> Anthropogenic isolation of sea bays. Lakes Bolshie and Malye Khruslomeny, Kandalakshsky Bay of the White Sea	80
<i>Krasikov V.A., Charkin A.N., Leusov A.E.</i> Tracing Submarine Groundwater Discharge and Coastal Upwelling in Posiet Bay Using Radium Isotopes (Autumn 2024)	85
<i>Leonova G.A., Maltsev A.E., Krivonogov S.K.</i> Biogeochemical features of the formation of Holocene deposits of the mineral lake Uchum (Krasnoyarsk region)	88
<i>Leusov A.E., Charkin A.N.</i> The Impact of Submarine Groundwater Discharge on the Estuarine Biota of the Buor-Khaya Bay (Laptev Sea)	93
<i>Leusov A.E., Charkin A.N., Pipko I.I., Pugach S.P., Dudarev O.V., Krasikov V.A.</i> Assessment of the submarine groundwater discharge role in the formation of the hydrochemical regime of the Anadyr Gulf waters of the Bering Sea (based on the results of the RV <i>Akademik Oparin</i> expedition in the fall of 2023)	96
<i>Lopatnikov E.A., Sattarova V.V., Ryabchuk D.V., Grigor'ev A.G., Sergeev A.Yu., Kim D.V.</i> Content and distribution features of rare earth elements in bottom sediments of the northwestern shelf Bering Sea	98
<i>Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M.</i> Compounds of reduced sulfur in the lakes separated from the White Sea	103

<i>Lukyanova O.N., Artamonova K.V., Varvarova A.O., Zubarevich V.L. Ivanov V.V., Klyuvitkin A.A., Murzakova Y.V., Torgunova N.I., Chultsova A.L. Shchuka A.S.</i>	108
Hydrobiochemical conditions of the Barents Sea in summer and autumn seasons	
<i>Maltsev A.E., Kirichenko I.S., Krivonogov S.K.</i> Geochemistry of bottom sediments of the littoral zone of Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan)	112
<i>Migdisova I.A., Demina L.L., Klyuvitkin A.A., Starodymova D.P., Lukianova O.N.</i> Trace elements in the zooplankton of the Nordic Seas	117
<i>Moiseeva Yu.A.</i> Features of the trace element distribution in the estuaries of minor and medium rivers of the North- Eastern part of the Black Sea	122
<i>Morgunova I.P., Litvinenko I.V., Kursheva A.V.</i> Hydrocarbon molecular markers as indicator of gas seepage in Quaternary sediments of the Derugin's depression (Sea of Okhotsk)	125
<i>Moseev D.S., Miskevich I.V., Berezina M.O.</i> Heavy metals in algae of the coast of the southern part of Vaygach Island	130
<i>Mosharov S.A., Borovkova K.A., Sashova O.A., Korsak M.N.</i> Production activity of phytoplankton in the shelf-slope zone of the Laptev Sea in summer	134
<i>Pipko I.I., Pugach S.P., Andreev A.G., Motora A.P., Dudarev O.V.</i> Carbonate system parameters and air-sea CO <sub>2</sub> fluxes in the western Chukchi Sea shelf shortly before sea ice formation	138
<i>Polyvanova T.K., Gershelis E.V., Yakushev E.V.</i> The impact of small river runoff on the geochemistry of sediments in the coastal zone on the example of the Asheamba River (Caucasian coast of the Black Sea)	143
<i>Purgina D.V., Moiseeva Ya.A., Gershelis E.V.</i> Arsenic and Phosphorus in the Pore Waters of Estuarine Sediments: A Case Study of the Yenisei and Pyasina Rivers (Kara Sea Shelf)	148
<i>Pushkareva E.M.</i> First data on the humic substances content in the upper layer of bottom sediments of the Kara Sea	153

<i>Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinin A.V.</i> Dissolved and labile particulate species of Mo, W and V in Black Sea water	157
<i>Savvichev A.S., Rusanov I.I., Zasko D.N<sup>2</sup>, Pimenov N.V.</i> Autotrophic production and heterotrophic bacterial activity in the Seas of the Eastern Arctic (Laptev, East Siberian, Chukchi seas and Bering Strait)	161
<i>Sashova O.A., Mosharov S.A., Borovkova K.A.</i> Variability of phytoplankton productive activity in areas of interaction of waters of different genesis in the western and northern parts of the Kara Sea	165
<i>Sevastyanov V.S., Fedulova V.Yu., Dushenko N.V., Voropaev S.A., Naimushin C.G., Dolgonosov A.A.</i> Gas saturation of the sedimentary cover of the Kara Sea depressions	169
<i>Semenov P.B., Malyshev E.V., Korneva Y.Yu., Shatrova E.V., Kil A.O., Gusev E.A., Filchuk K.V.</i> Dissolved organic matter in the water column and pore water of bottom sediments in high-latitude Arctic (On the data of North-Pole-41)	173
<i>Silkin V.A., Pautova L.A., Kravchishina M.D., Klyuvitkin A.A.</i> Biological carbon pump in the High Arctic summer	176
<i>Sorokina V.V., Kulygin V.V., Alyoshina E.G.</i> Assessment of the carbonate system parameters in the lower Don and the eastern part of the Taganrog Bay in 2024	181
<i>Streltsova E.A., Belyaev N.A., Dorokhova E.V.</i> Relationship between organic carbon content and grain size distribution of bottom sediments of the Kara Sea	186
<i>Toropov A.S., Slukovskii Z.I., Stroganov N.A., Denisov D.B., Adamskaya P.N.</i> Early diagenesis in a stratified basin: rare and trace element distribution across a redox gradient (Lake Mogilnoe, Kildin Island, Murmansk region)	190
<i>Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Gar'kusha D.N., Dotsenko N.V.</i> Hydrotroilite in bottom sediments of aquatic ecosystems	195
<i>Fedulov V.Y., Belyaev N.A.</i> Some distribution features of particulated organic carbon in the Kara Sea (analysis of the long-term data)	200
<i>Fedulov V.Y., Belyaev N.A.</i> Distribution features of dissolved organic carbon in the Kara Sea (analysis of the long-term	202

data)	
<i>Fedulov V.Y., Streltsova E.A., Pushkareva E.M., Belyaev N.A.</i>	205
Methods for determining the content of certain components in organic matter in suspended and dissolved forms	
<i>Shved V.A., Kravchishina M.D., Egorov A.V., Kalgin V.Yu., Kluchantseva A.P., Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Streletskaya I.D.</i>	209
Methane concentrations in water column of the western Eurasian Arctic shelf according to the data of the 96 <sup>th</sup> cruise of the R/V <i>Akademik Mstislav Keldysh</i>	
<b>White Sea System, 4-D investigations</b>	
<i>Brusilovsky Yu.V., Baluev A.S.</i>	215
Models of the deep structure of the Earth's crust of the paleorift system of the White Sea based on the results of a comprehensive analysis of geophysical data	
<i>Vyatkin E.D., Entin A.L., Repkina T.Yu.</i>	220
Modeling of glacio- isostatic adjustments in SELEN: capabilities and limitations (a case study of the White Sea)	
<i>Demidenko N.A., Gordeev V.V., Kochenkova A.I.</i>	225
The modern hydrological regime and sediment movement in the Mezen and Kuloy estuaries	
<i>Ivanova D.A., Savvichev A.S., Demidenko N.A., Belenkova V.V.</i>	230
Phytoplankton of Kislaya Guba – a water body separated from the Barents Sea by dam of tidal power plant	
<i>Kochenkova A.I., Starodymova D.P., Lkhov A.S., Gordeev V.V.</i>	234
Dynamics of sediment runoff of the Severnaya Dvina River during the spring flood in 2015–2025.	
<i>Krasnova E.D., Voronov D.A., Zhiltsova A.A., Ivanova D.A., Labunskaya E.A., Mindolina Yu.V., Patsaeva S.V., Plotnikov A.V., Sokolovskaya Yu.G.</i>	239
Functional zoning of the ecosystem of the coastal meromictic lake Trekhtzvetnoe	
<i>Iglin S.M., Korobov V.B.</i>	244
Dynamic characteristics of waves, levels, and currents in the southeastern part of the Dvinsky Bay of the White Sea in summer and autumn 2022 (based on instrumental observations)	
<i>Miskevich I.V., Kalashnikov A.V.</i>	250
Statistical characteristics of	

arsenic and metal content in sediments of the central part of the Northern Dvina River estuary	
<i>Moseev D.S., Leshchev A.V., Miskevich I.V.</i> Special features of sediment accumulation on the south-eastern coast littoral of the of the Onega Bay of the White Sea	255
<i>Repkina T.Yu., Leontiev P.A., Kublitskiy Yu.A., Krekhov A.K., Orlov A.V., Levkova D.N., Vyatkin E.D., Yakovleva A.P.</i> Morphodynamics of the White Sea coasts during the Late Glacial and Holocene: Solovetsky Archipelago and Zhizhgin Island	259
<i>Savenko A.V.</i> The modern trend of changes in the character of distribution of dissolved mineral phosphorus in the mouths of small rivers of the Kandalaksha Bay of the White Sea	264
<i>Starodymova D.P., Kotova E.I., Kochenkova A.I.</i> Atmospheric input of matter to the Severnaya Dvina basin as a source of heavy metals in river runoff	269
<i>Chernov I.A., Tolstikov A.V.</i> Numerical model of a very small water body: the Blagopoluchia bay in the White Sea	273
<i>Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Savvichev A.S., Novigatsky A.N.</i> Accumulation of heavy metals by fruticose epiphytic lichens of the Kenozersky National Park (Arkhangelsk Region)	277

***БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ В МОРЯХ И  
ОКЕАНАХ***

***BIOGEOCHEMICAL PROCESSES  
IN THE SEAS AND OCEANS***

**Бекеша И.А.<sup>1</sup>, Саттарова В.В.<sup>1</sup>, Алаторцев А.В.<sup>1</sup>,  
Усягина И.С.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: [bekesha.ia@poi.dvo.ru](mailto:bekesha.ia@poi.dvo.ru); <sup>2</sup>Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск)

## **Аккумуляция тяжелых металлов в донных отложениях глубоководных районов северо-западной части Тихого океана**

**Bekesha I.A.<sup>1</sup>, Sattarova V.V.<sup>1</sup>, Alatortsev A.V.<sup>1</sup>, Usyagina I.S.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS, Vladivostok; <sup>2</sup>Murmansk Marine Biological Institute (MMBI) of RAS, Murmansk)

## **Accumulation of heavy metals in bottom sediments of deep-sea areas of the northwestern Pacific Ocean**

Ключевые слова: тяжелые металлы, глубоководные донные отложения, северо-западная часть Тихого океана

В работе рассматриваются вопросы накопления тяжелых металлов в донных отложениях Курило-Камчатского и Алеутского желобов. Дается характеристика уровня концентраций тяжелых металлов в донных отложениях. Проведено сравнение двух глубоководных районов по геохимическим параметрам. Представлены результаты эколого-геохимической оценки состояния донных отложений глубоководных районов.

Целью данного исследования является изучение состава и распределения тяжелых металлов (ТМ) в глубоководных отложениях северо-западной части Тихого океана для понимания процессов седиментации. Поскольку отложения могут накапливать загрязняющие вещества, изучение их состава позволяет нам оценить уровень загрязнения и выявить источники этих загрязнений в рассматриваемом районе.

Концентрации ТМ (Cu, Ni, Zn, As, Cd, Pb) в поверхностных отложениях, отобранных в Курило-Камчатском (ККЖ) и Алеутском желобах (АЖ) в российско-немецких глубоководных экспедициях по проектам KuramBio I и II («Исследование биоразнообразия глубоководного бентоса района Курило-Камчатского желоба»), а также на НИС «Sonne» в 2014 и 2016 гг. и в ходе российско-китайской совместной водолазной экспедиции на НИС «Tan Suo Yi Hao» в 2024 г., анализировались методом открытого кислотного разложения на ИСП-МС Agilent 7500 с (Agilent Technologies, США) в ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Определение содержания общего органического углерода (ТОС) было выполнено на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония) в лаборатории Геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток). Для определения фоновых концентраций ТМ был выбран

керна донных отложений, датированный радиоизотопным методом на основе свинца-210 в лаборатории ММБИ РАН (г. Мурманск). Анализ проводили на многоканальном спектрометре рентгеновского и  $\gamma$ -излучения b13237 (Canberra, США) со свинцовой защитой детектора «Экран-2П» фирмы «Аспект» (Россия).

Образцы осадков со станций, расположенных в АЖ и ККЖ и прилегающей абиссальной равнины Тихого океана, представлены в основном алеврит-пелитовыми отложениями. На основе данных датирования и по рассчитанным возрастным моделям скорость седиментации в ККЖ составила  $\sim 1.64$  мм/год, в АЖ –  $\sim 1.0$  мм/год. Среднее содержание ТОС в осадках ККЖ составляет 0.96%, при этом максимальные концентрации до 1.55% отмечены в пробах с абиссальной равнины в районе к востоку от о. Хоккайдо, на выходе из пролива Буссоль и пролива Крузенштерна, что, вероятно, связано с выносом высокопродуктивных поверхностных вод из Охотского моря. Среднее содержание ТОС в осадках Алеутского желоба ниже и составляет 0.75%, минимальные концентрации отмечены в районе сочленения ККЖ и АЖ, возможно, из-за большей подвижности вод в этом районе, что препятствует накоплению тонкодисперсного органического вещества в осадках. Осадки ККЖ и прилегающей абиссальной равнины отличаются максимальными средними содержаниями Cu (99.7 мг/кг), Cd (0.18 мг/кг) и Pb (17.3 мг/кг), в отличие от отложений АЖ. По сравнению со средними концентрациями ТМ в верхней континентальной коре [1], глубоководные осадки Курило-Камчатского и Алеутского желобов обогащены Cd, Cu, As.

Для оценки степени накопления ТМ в донных отложениях по сравнению с фоновыми (доиндустриальными) концентрациями использовались такие экологические параметры, как коэффициент обогащения (EF) и индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ). Результаты показали, что осадки ККЖ и АЖ характеризуются незначительным и умеренным обогащением Cu и As, соответственно, вызванными природными факторами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (проект № 124022100084-8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // *Reviews of Geophysics*. 1995. V. 33. Is. 2. P. 241–265.

This study examines the accumulation of heavy metals in the bottom sediments of the Kuril-Kamchatka and Aleutian trenches. A comprehensive characterization of metal contents in the sediments is provided. A comparison of geochemical parameters between the two deep-sea regions is conducted. The results of an eco-geochemical assessment of the sediment condition in these areas are presented.

**Беляев Н.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: ratnick@mail.ru)

## **Биогеохимический цикл органического углерода в Карском море**

**Belyaev N. A.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, e-mail: ratnick@mail.ru)

## **Organic carbon biogeochemical cycle in the Kara Sea**

Ключевые слова: Карское море, биогеохимия, органический углерод

Выдвинута гипотеза, что формирование концентраций и состава органического вещества донных осадков Карского моря в основном определяется конечной сорбционной способностью минеральной матрицы. При этом, ее сорбционная способность практически исчерпывается еще до поступления минерального вещества в бассейн моря с твердым стоком. Новообразованное органическое вещество автохтонного происхождения не может сорбироваться на поверхности осадков, поэтому не возникают условия для его захоронения, и на составе ОБ донных осадков не отражаются геохимические процессы, протекающие в акватории моря.

Исследование содержания органического вещества (ОВ) в шельфовых морях Российской Арктики в общем, и в Карском море, в частности, стартовало в начале двадцатого века [1]. В разное время фокус исследований смещался на определение потенциала биологической продуктивности [2], состава и генезиса ОБ донных отложений [3], влияние речного стока на функционирование экосистем [4].

К настоящему времени известно, что содержание органического углерода в осадках Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей достаточно высоко (более 1%) [5], а его состав, установленный по анализу биомаркеров, практически однообразен и имеет преимущественно терригенное происхождение [6]. Этому давалось логичное объяснение, что основной вклад в формирование состава вносит органическое вещество, поставляемое с суши, а вклад автохтонного ОБ в состав осадков крайне скуден, из-за крайне низкой биологической продуктивности исследуемого района. Резкое увеличение содержания автохтонной компоненты органического вещества осадков на границах указанного региона и кромке континентального склона [7–9] в рамках данной концепции объяснения не находило. Исследования органического вещества воды, взвеси и донных осадков, проводимые в рамках программы "Экосистема морей сибирской Арктики", представляют возможным внести существенные коррективы в механизм наблюдаемого явления.

Основным результатом работы коллектива ученых в рамках вышеуказанной программы под руководством М.В. Флинта было открытие факта широко развитого весеннего цветения в открытой акватории Карского

моря, сопровождающегося синтезом значительных биомасс фитопланктона и формированием ранее не учитывавшегося в геохимических балансах органического вещества. Концентрации взвешенного органического углерода в пике этого процесса могут достигать 1 мг/л, а растворенного 10 мг/л. При этом продуктивные горизонты не локализируются в верхнем перемешанном слое, а распространяются в область под пикногалоклином до глубины 60 м. Высокие скорости биогеохимических процессов не позволили выявить данный феномен в предшествующих программе экспедициях, которые организовывались исключительно в конце летнего и в осенний сезоны. Насыщение водной толщи автохтонным органическим веществом способствует формированию обогащенного им поверхностного слоя донных осадков [10, 11], но не фиксируется в подстилающих горизонтах.

В результате совместного исследования биомаркеров состава ОВ взвеси и донных осадков также выявлено интересное противоречие. В составе n-алканов ОВ взвеси преобладает вещество автохтонного генезиса, а в ОВ осадков аллохтонного, что закономерно. Но при этом степень диагенетического преобразования ОВ взвеси выше (СР1~3), чем ОВ донных осадков (СР1~5), то есть терригенная часть ОВ взвеси диагенетически более преобразована, чем та же компонента осадков. В классической модели седиментации взвесь является источником поступления вещества в осадки. Органическое вещество исследованной взвеси данным источником служить не может. Данный факт наблюдается не только в районах открытого моря, но и непосредственно в зоне околонулевой солености.

Нами была сделана попытка комплексно объяснить наблюдаемые противоречия. Органическое вещество в осадках может аккумулироваться в трех видах: быть включено в минеральную матрицу, сорбироваться на поверхности минеральных частиц или входить в осадки в виде детрита. Первый тип вещества не специфичен для Карского моря, хотя и наблюдается в других шельфовых морях, третий не склонен к захоронению из-за разницы плотностей детрита и минеральной матрицы и вероятно высоких скоростей придонных течений в Карском море. Отсюда, основным механизмом накопления органического вещества в толще осадка является второй – адсорбция на поверхности минеральной матрицы.

Шельфовые моря Российской Арктики принимают в себя наибольший объем речного стока по сравнению с объемами бассейна. При этом массы поставляемого со стоком органического вещества во взвешенной и растворенной форме сопоставимы с массой поступающего взвешенного вещества. Эта особенность обусловлена специфичным болотисто-лесным бассейном водосбора. Таким образом, в речных водах всегда присутствует доступное для адсорбции органическое вещество, и поверхность минеральной матрицы может исчерпывать свою сорбционную способность еще до прохождения геохимического барьера. При этом, данные о

химическом составе ОВ речного стока показывают высокую степень его преобразованности, чтобы предполагать, что скорость его биодegradации будет незначительной. При изменении солёности сорбционные свойства матрицы увеличиваются из-за изменения электрохимического потенциала. Также на геохимическом барьере происходят активные процессы коагуляции и флокуляции РОУ [12]. Происходит окончательное насыщение минеральной матрицы органическим веществом, и сорбционные способности ее исчерпываются. Материал береговой абразии также сразу попадает в воды, обогащенные терригенным РОУ, которое сорбируется на его поверхности.

В результате совокупности данных процессов сорбционная способность минерального материала поступающего в бассейн моря уже полностью исчерпана, новообразованное автохтонное органическое вещество не может аккумулироваться на его поверхности, остается в верхнем слое осадков в виде биодоступного детрита и неизбежно с высокой скоростью перерабатывается, не оставляя следов в донных осадках.

Отдельно стоит отметить, что существуют два принципиально разных сорбционных механизма – липидно-битумный и гуминовый, при этом первому в практике океанологических исследований уделяется гораздо больше внимания, чем второму, хотя второй из-за специфики исследуемого ОВ имеет в данном случае гораздо более высокое значение.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы нами были заново выполнены оценки масс поступающего в бассейн Карского моря органического вещества [13]. Прослежено поведение растворенного и взвешенного вещества в бассейне моря, показавшее влияние вод речного стока практически на всю его акваторию [14].

Исследован липидный состав взвеси. Показано повсеместное преобладание автохтонной фракции ОВ над аллохтонной.

Определен гранулометрический состав поверхностного слоя осадков, рассчитана сорбционная поверхность и прослежена ее связь с содержанием в них органического углерода. Показана устойчивая связь содержания органического углерода в осадках с площадью их сорбционной поверхности [15]. Выявлены области с избыточным содержанием углерода относительно теоретических значений и области его пониженных значений относительно тренда. Области повышенных концентраций локализуются в эстуарных зонах, маркируя процессы коагуляции и флокуляции ОВ. Области пониженных тяготеют к зонам ледниковой разгрузки вблизи побережья Новой Земли и окраинным зонам моря. И именно в последних может наблюдаться возрастание доли автохтонного органического вещества в осадках.

Разработана методика и впервые определены концентрации гумусовых кислот в том же массиве донных осадков Карского моря. Показано, что доля гумусовых кислот в составе ОВ осадков в среднем превышает 50% и может

достигать практически 100 в эстуарных зонах [16]. Показано, что корреляционная зависимость ОВ/грансостав улучшается при возрастании доли гумусовых кислот в составе осадков.

Подтверждено существование обогащенного автохтонным органическим веществом поверхностного слоя донных осадков. Показана сезонность его существования.

Если гипотеза соответствует действительности, то на ее основе можно сделать следующий вывод: могут существовать такие седиментационные обстановки, в которых новообразованное автохтонное органическое вещество не может захорониться из-за исчерпания сорбционной способности осадков, поэтому оно быстрее подвергается полной деструкции и, следовательно, не выводится из современного цикла углерода на сколь-либо долгий срок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшкова Т.И. Осадки Карского моря // Тр. Всес. Гидробиолог. о-ва. 1957. Т. 8.
2. Брочкая В.А., Зенкевич Л.А. Материалы по количественному учету донной фауны Баренцова, Белого и Карского морей // Тр. Гос. океаногр. ин-та. 1932. Т. 2. Вып. 2. С. 41–57.
3. Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.]
4. Siberian river run-off in the Kara Sea / Ed. R. Stein, K. Fahl, D.K. Futterer et al. Elsevier Science, 2003. 488 p.
5. Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al. CASCADE – The Circum-Arctic Sediment CARbon DatabasE // Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 2561–2572. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2561-2021>.
6. Stein R., Macdonald R.W. Geochemical Proxies Used for Organic Carbon Source Identification in Arctic Ocean Sediments // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. P. 24–32.
7. Petrova V.I., Batova G.I., Zinchenko A.G. et al. The East Siberian Sea: Distribution, Sources and Burial of Organic Carbon // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. P. 204–212.
8. Семенов П.Б., Мальшев С.А., Гусев Е.А. Уникальные особенности состава органического вещества донных осадков прибрежной части о-ва Комсомолец (по данным распределения n-алканов в донных осадках) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2019. Вып. 5. С. 43–46.
9. Леин А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И. и др. Биогеохимические процессы в Чукотском море // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 3. С. 247–266.
10. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море в сентябре 2011 г. //

Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–679.

11. Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органическое вещество воды, взвеси и донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 748–757.

12. Лазарева Е.В., Беляев Н.А., Романкевич Е.А. Методический подход к изучению коллоидной фракции органического вещества природных вод // XVIII Международная школа морской геологии «Геология морей и океанов». М.: ГЕОС, 2009. Т. III. С. 80–82.

13. Федулов В.Ю., Беляев Н.А., Гордеев В.В. и др. Новая оценка поставки растворенного органического углерода с водами Оби и Енисея в бассейн Карского моря // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 375–381.

14. Беляев Н.А., Федулов В.Ю., Кравчишина М.Д., Щука С.А. Содержание органического углерода в растворенной и взвешенной формах в водах Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 217–270.

15. Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Дорохова Е.В. Связь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков Карского моря // Настоящий сборник

16. Пушкарева Е.М. Беляев Н.А. Первые данные о содержании гуминовых веществ в верхнем слое донных осадков Карского моря // Настоящий сборник

A hypothesis has been put forward that the formation of concentrations and composition of organic matter in the bottom sediments of the Kara Sea is mainly determined by the final adsorption capacity of the mineral matrix. At the same time, its adsorption capacity is practically exhausted even before the mineral matter enters the sea basin with solid runoff. Newly formed organic matter of autochthonous origin cannot be adsorbed on the surface of sediments, therefore, conditions for its burial do not arise and the geochemical processes occurring in the sea water area are not reflected in the composition of the OM of the bottom sediments.

**Брюханов А.Л.<sup>1</sup>, Саввичев А.С.<sup>2</sup>, Кравчишина М.Д.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: brjuchanov@mail.ru; <sup>2</sup>ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва; <sup>3</sup>Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва)

**Микробные сообщества морских донных отложений Западно-Арктического шельфа России и их роль в ключевых биогеохимических процессах**

**Bryukhanov A.L.<sup>1</sup>, Savvichev A.S.<sup>2</sup>, Kravchishina M.D.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>2</sup>Federal Research Center of Biotechnology RAS, Moscow; <sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Microbial communities of marine bottom sediments of the Western Arctic shelf of Russia and their role in key biogeochemical processes**

Ключевые слова: донные отложения, Арктический шельф, Баренцево море, Карское море, метан, метаногены, метанотрофы, сульфатредукторы, нитрификаторы

С использованием высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК и метагеномного анализа определен таксономический состав микробных сообществ на различных горизонтах донных отложений Баренцева, Печорского и Карского морей. Показана взаимосвязь различных групп микроорганизмов с биогеохимическими процессами круговорота углерода, серы и азота в арктических морях.

В настоящее время изучению геологии, геохимии и экологии арктических морских регионов, обладающих большим экономическим потенциалом, уделяется повышенное внимание. В нашем исследовании с использованием высокопроизводительного секвенирования регионов V3–V4 гена 16S рРНК и метагеномного анализа был определен полный таксономический состав микробных сообществ в образцах донных отложений Баренцева, Печорского и Карского морей, отобранных в рамках экспедиционной программы ИО РАН «Европейская Арктика: геологическая летопись изменений окружающей среды и климата» в ходе нескольких рейсов (89-й (этап 1), 93-й и 96-й) НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2022–2024 гг., в том числе у берегов архипелагов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, а также у полуострова Ямал. Выделенные газовые пробы анализировали на содержание метана (CH<sub>4</sub>) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>). В соответствующих образцах донных отложений также определяли интенсивности процессов метаногенеза, метаноокисления и сульфатредукции. Показана тесная связь различных групп анаэробных и аэробных микроорганизмов с ключевыми биогеохимическими процессами круговорота углерода, серы и азота.

В Карском море концентрация метана на верхних окисленных горизонтах (0–5 см) донных отложений составляла около 0.02–0.04 мкМ и

увеличивалась на подстиляющих восстановленных горизонтах (18–20 см) до 0.1–0.7 мкМ [1], достигая 7.24 мкМ на 65-см горизонте у выхода из Байдарацкой губы. Интенсивность образования  $\text{CH}_4$  в этой акватории можно оценить величиной до  $3 \times 10^{-10}$  мкг/л  $\times$  сек [1]. В Баренцевом море содержание метана в донных отложениях обычно существенно выше – от 0.2 до 2.4 мкМ на верхних окисленных горизонтах и до 9.5 мкМ на горизонте 16–19 см. Интенсивность окисления метана на верхних окисленных горизонтах варьировалась от 2 до 23 нмоль  $\text{CH}_4$ /л  $\times$  сут, уменьшаясь до 0,3 нмоль  $\text{CH}_4$ /л  $\times$  сут на подстиляющих восстановленных горизонтах 16–19 см [2]. Концентрация сероводорода на восстановленных горизонтах донных отложений арктических морей была в диапазоне от 6 до 153 мкМ, а интенсивность сульфатредукции в отложениях Баренцева моря варьировалась от 0.2 до 27.4 нмоль/см<sup>3</sup>  $\times$  сут, что косвенно свидетельствует о наличии метаболически активных сульфатредукторов [3].

На окисленных и подстиляющих восстановленных горизонтах донных отложений на некоторых станциях в Баренцевом море и на большинстве станций в Карском море обнаружили хемолитотрофных архей семейства *Nitrosopumilaceae* (2.1–27.4% от всех прочтений последовательностей гена 16S рРНК, а на восстановленных горизонтах донных отложений Байдарацкой губы Карского моря вплоть до 35.6%). Эти археи осуществляют окисление аммиака до нитрит-аниона (нитрозные микроорганизмы) и способны существовать в местообитаниях с очень низким содержанием кислорода [4].

Среди строго анаэробных метаногенных архей на восстановленных ( $E_h$  от –63 до –445 мВ) горизонтах донных отложениях над крупными залежами углеводородов Южно-Карской нефтегазоносной области в относительно умеренном количестве детектировали, в основном, представителей порядков *Methanosarcinales*, *Methanomassiliicoccales* и *Methanobacteriales* (по 0.4–3.6% прочтений), но на более верхних горизонтах (0–20 см) они почти полностью отсутствовали [5]. Анаэробное окисление метана на подповерхностных горизонтах донных отложений арктических морей осуществляется, вероятно, весьма немногочисленными археями из групп ANME–2a–2c, относящимися к филуму *Halobacterota*, в тесном консорциуме с сульфатредуцирующими бактериями из филума *Desulfobacterota*. В Байдарацкой губе и на востоке Пухучанской впадины (юг Карского моря) на поверхностном окисленном горизонте донных отложений (0–2 см,  $E_h$  от 60 до 175 мВ) были обнаружены аэробные метанотрофные бактерии, относящиеся к трем семействам: *Methyloiligellaceae*, *Methylophagaceae* и *Methylomonadaceae*. Надо отметить, что представители семейства *Methyloiligellaceae* встречались на всех станциях Карского моря (1.52–2.61% прочтений) [5] и на ряде станций Баренцева и Печорского морей. По всей видимости, окисление метана в арктических донных отложениях, где на большинстве исследованных нами

станций его концентрация весьма резко увеличивалась с глубиной горизонта, происходит преимущественно в аэробных условиях, на верхних горизонтах с высокой относительной численностью и большим филогенетическим разнообразием метанотрофов.

Сульфатредуцирующие бактерии – строго анаэробные микроорганизмы, получающие энергию путем окисления низкомолекулярных органических соединений или молекулярного водорода, что сопряжено с восстановлением сульфата до сероводорода. СРБ широко распространены в различных анаэробных экосистемах, где присутствует сульфат, в особенности, в морских донных отложениях и илах сточных вод. СРБ играют ключевую роль в глобальных биогеохимических циклах углерода и серы в Мировом океане, способствуя минерализации примерно 50% органического углерода в донных отложениях [6], а также вовлечены в функционирование антропогенных экосистем, участвуя в процессах микробной коррозии и биоремедиации от тяжелых металлов и радионуклидов. Ранее было показано, что интенсивность сульфатредукции в донных отложениях арктических морей часто весьма высока [3, 7, 8], а несколько новых видов психрофильных СРБ, выделенных из таких отложений в чистые культуры, были способны сохранять высокую метаболическую активность даже при отрицательных температурах [9].

Наибольшая относительная численность СРБ была обнаружена в донных отложениях Баренцева и Карского морей на горизонте 18–20 см (вплоть до 14.5–27.6% прочтений), значительную долю из них в этих восстановленных ( $E_h$  от –63 до –370 мВ) донных илах составляли представители семейства *Desulfobacteraceae* [3]. На этом же горизонте на ряде станций в районе покмарков и контуритового дрефта в Карском море детектировали также некультивируемых бактерий из клады Sva1033 отряда *Desulfuromonadales* (3.9–12.5% прочтений), способных, согласно анализу известных геномов, к анаэробному дыханию, используя в качестве акцептора электронов элементную серу и железо(III). Необходимо отметить, что СРБ относящиеся к семействам *Desulfovibrionaceae* и *Desulfobulbaceae*, многие представители которых известны своей устойчивостью к кислороду благодаря наличию эффективных антиоксидантных систем, присутствовали даже на верхних окисленных (0–5 см,  $E_h$  от 60 до 226 мВ) горизонтах арктических донных отложений (до 3.95% прочтений). Довольно многочисленными в донных отложениях Баренцева моря были и некультивируемые СРБ из клад SAR324 и Sva0485 [3]. На ряде станций в Баренцевом, Печорском и Карском морях в семействах *Desulfobulbaceae* и *Desulfobacteraceae* значительная часть СРБ была отнесена к неизвестным родам. Образующий СРБ сероводород может окисляться нитратредуцирующими бактериями семейства *Sulfurovaceae* [10].

На горизонте 65 см в значительном количестве (до 8.1% прочтений) на некоторых станциях Карского моря детектировали бактерий рода *Thauera*

(семейство *Zoogloeaceae*, класс *Betaproteobacteria*), потенциально способных к анаэробному дыханию, в том числе и с использованием селенита в качестве акцептора электронов. На восстановленных горизонтах арктических донных отложений также часто присутствовали (1.4–8.8% прочтений) анаэробные хемогетеротрофные бактерии семейства *Anaerolineaceae*.

Таким образом, таксономический состав микробных сообществ морских донных отложений Западно-Арктического шельфа России существенно отличается в зависимости от места отбора проб и горизонта отложения, что обусловлено весьма различными условиями седиментации, составом донных отложений и поровых вод, редокс-условиями. Биогеохимический цикл серы [6] в донных отложениях арктических морей тесно связан с анаэробным окислением метана и циклом азота, который включает окисление аммиака (как на верхних окисленных горизонтах, так и на подстилающих горизонтах с низким содержанием  $O_2$ ) и денитрификацию, сопряженную с окислением сульфида на восстановленных горизонтах. В донных отложениях отмечена большая численность некультивируемых и неидентифицируемых до уровня рода различных гетеротрофных микроорганизмов [11], что свидетельствует о потенциальных перспективах идентификации, выделения в чистые культуры и всестороннего физиолого-биохимического изучения представителей новых таксонов бактерий и архей, обитающих в пока еще малоисследованной области Мирового океана – арктических морях.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы благодарят д.т.н. Севастьянова В.С. (ГЕОХИ РАН, Москва), а также экипаж и весь научный состав НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь в проведении экспедиционных работ. Исследования проведены при финансовой поддержке РНФ, грант № 20-17-00157-П, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропаев С.А., Севастьянов В.С., Душенко Н.В., Брюханов А.Л. Оценка потока метана со дна Карского моря // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 138–142.
2. Begmatov S., Savvichev A.S., Kadnikov V.V. et al. Microbial communities involved in methane, sulfur, and nitrogen cycling in the sediments of the Barents Sea // *Microorganisms*. 2021. V. 9. № 11. P. 2362–2382.
3. Briukhanov A.L., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. Phylogenetic diversity in sulphate-reducing bacterial communities from oxidised and reduced bottom sediments of the Barents Sea // *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal*

of General and Molecular Microbiology. 2022. V. 115. № 6. P. 801–820.

4. Könneke M., Bernhard A.E., de la Torre J.R. et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon // Nature. 2005. V. 437. № 7058. P. 543–546.

5. Брюханов А.Л., Севастьянов В.С., Кравчишина М.Д. и др. Состав микробных сообществ цикла метана в верхних слоях донных осадков Карского моря // Геохимия. 2024. Т. 69. № 6. С. 511–519.

6. Jørgensen B.B., Findlay A.J., Pellerin A. The biogeochemical sulfur cycle of marine sediments // Frontiers in Microbiology. 2019. V. 10. P. 849–875.

7. Ravenschlag K., Sahm K., Knoblauch C. et al. Community structure, cellular rRNA content, and activity of sulfate-reducing bacteria in marine Arctic sediments // Applied and Environmental Microbiology. 2000. V. 66. № 8. P. 3592–3602.

8. Finke N., Vandieken V., Jørgensen B.B. Acetate, lactate, propionate, and isobutyrate as electron donors for iron and sulfate reduction in Arctic marine sediments, Svalbard // FEMS Microbiology Ecology. 2007. V. 59. № 1. P. 10–22.

9. Knoblauch C., Sahm K., Jørgensen B.B. Psychrophilic sulfate-reducing bacteria isolated from permanently cold Arctic marine sediments: description of *Desulfofrigus oceanense* gen. nov., sp. nov., *Desulfofrigus fragile* sp. nov., *Desulfofaba gelida* gen. nov., sp. nov., *Desulfotalea psychrophila* gen. nov., sp. nov. and *Desulfotalea arctica* sp. nov. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 1999. V. 49. № 4. P. 1631–1643.

10. Sun Q.L., Zhang J., Wang M.X. et al. High-throughput sequencing reveals a potentially novel *Sulfurovum* species dominating the microbial communities of the seawater-sediment interface of a deep-sea cold seep in south China Sea // Microorganisms. 2020. V. 8. № 5. P. 687–704.

11. Власов Д.Ю., Брюханов А.Л., Кирцидели И.Ю., Кураков А.В. Разнообразие и структура сообществ грибов и гетеротрофных бактерий в поверхностных донных отложениях Карского моря // Микология и фитопатология. 2025. Т. 59. № 2. С. 93–110.

Using high-throughput sequencing of the 16S rRNA gene and metagenomic analysis, the taxonomic composition of microbial communities at different layers of bottom sediments in the Barents, Pechora and Kara Seas was determined. The relationship between different groups of microorganisms and biogeochemical processes of carbon, sulfur and nitrogen cycles in the Arctic seas was shown.

**Будько Д.Ф., Стародымова Д.П.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [budko@ocean.ru](mailto:budko@ocean.ru))

**О факторах распределения микроэлементов в  
поверхностном слое донных осадков Карского моря**

**Budko D.F., Starodymova D.P.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**The factors of trace elements distribution in the surface layer of  
bottom sediments of the Kara Sea**

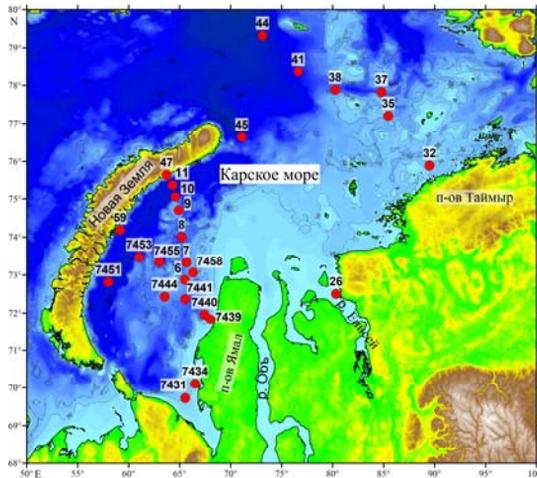
Ключевые слова: тяжелые металлы, осадконакопление, минеральный состав, Карское море

Представлено распределение 41 элемента и  $C_{орг}$  в поверхностных осадках разных районов Карского моря. Выделено пять геохимических ассоциаций элементов, связанных преимущественно с составом литогенного материала, и, в меньшей степени, с гидрогенными процессами (аутигенное минералообразование и биологическая продуктивность) в осадках Карского моря.

Система осадконакопления Карского моря формируется в условиях поставки пресноводного стока Оби и Енисея, абразии рыхлых береговых пород, водообмена с теплыми и солеными баренцевоморскими водами на западе, а также с холодными водами центральной Арктикой на севере и водами моря Лаптевых на востоке. Потенциальное поступление загрязняющих веществ с массивным речным стоком может создавать определенные экологические риски для экосистем Карского моря, что усугубляется возможной трансформации среды этого арктического бассейна в результате глобальной изменчивости климата. Так, за последние десятилетия выявлена тенденция к сокращению ледяного покрова в Карском море в летний период [4].

Морские донные осадки, аккумулирующие осадочный материал, поступающий из различных природных или антропогенных источников, служат природным планшетом, в котором регистрируются показатели состояния экосистемы. Элементному составу донных отложений Карского моря посвящено множество исследований, однако большинство из них касается распределения макроэлементов в этом арктическом бассейне [1, 3 и многие другие]. Между тем, микроэлементы, носителями которых являются различные биогенные и терригенные компоненты (карбонаты, Fe и Mn оксигидроксиды, сульфиды, глинистые и обломочные минералы), являются наиболее показательными индикаторами процессов и источников формирования осадочного материала. Содержание тяжелых металлов может указывать на степень антропогенного воздействия на водоем. Целью данной работы является выделение основных факторов распределения микроэлементов в донных отложениях Карского моря.

В рамках исследования проанализировано 26 проб поверхностного слоя (0–5 см) донного осадка, отобранных в Карском море в 128-м рейсе НИС «Профессор Штокман» и 89-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2014 и 2022 гг. соответственно (рисунок). Осадок отбирался с помощью дночерпателя «Океан-50», замораживался ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) и в дальнейшем подвергался лиофильной сушке в лабораторных условиях. Высушенный и растертый осадок разлагался методом спекания с гидрокарбонатом натрия и последующим растворением спекшегося материала в смеси концентрированных  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HCl}$ . Содержание Li, Be, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, и U определялось методом ICP-MS на приборе Agilent 7500a (Agilent Technologies, США). Железо определялось методом ААС на спектрометре Квант-2А (Кортек, Россия). Органический углерод измерялся методом инфракрасной спектроскопии с помощью анализатора углерода МЕТАВАК CS-30 (НПО ЭКСАН, Россия). Выявление закономерностей между исследуемыми геохимическими параметрами выполнялось с помощью корреляционного и факторного (РСА) анализов.



**Рисунок.** Карта станций с отбором проб поверхностных осадков Карского моря.

С помощью РСА анализа исследуемые 42 геохимических параметра были упрощены до шести компонент, показывающих их общую геохимическую ассоциативность и схожее распределение в осадках Карского моря. В первую группу, составляющую половину общей дисперсии данных (50.6%), вошли такие элементы, как Al, Y и другие РЗЭ, а также Th. Максимальная, но недостоверная факторная нагрузка данной

компоненты (0.5–0.7) также показана для Ti и Rb. Нахождение Al и Ti в данной ассоциации может являться показателем влияния алюмосиликатных минералов на распределение этой группы элементов в осадках Карского моря. Известно, что нахождение PЗЭ в осадках западной части Карского моря связано с глинистыми минералами [2]. Алюмосиликаты также могут быть носителями Rb и Th. Эти металлы имеют повышенное содержание в слюдах, и к тому же Th способен к избирательной адсорбции на глинистых минералах [5, 7].

Содержание Al, Ti, Rb, Y и лантаноидов в поверхностных осадках Карского моря приближено к их среднему содержанию в верхней части континентальной коры [6]. В среднем коэффициент обогащения (EF) для этих металлов составляет 0.8–1.4. Только в случае Ti зафиксирована умеренная обогащенность (EF 3) осадка на ст. 7434 у п-ва Ямал во внешней части Байдарацкой губы. В целом, для осадков, простирающихся вдоль п-ва Ямал (станции 7434 и 7440), так же как для осадков центральной и северной частей Западно-Карской ступени (станции 10, 7453, 7455) характерно повышенное содержание данных металлов. Источником алюмосиликатов в этих районах Карского моря может выступать абразивный материал п-ова Ямал, который покрыт рыхлыми отложениями позднего плейстоцена и голоцена [1].

Вторая компонента (16.6% общей дисперсии) включает редкие литофильные металлы (Zr, Nb, Hf и Ta), а также Sr, Ba и U. Выделяется также максимальная нагрузка данной компоненты на Cd, но с недостоверным значением. Нахождение в осадках Карского моря Sr, Zr, Nb, Hf, Ta и U может быть связано с минералами тяжелой подфракции, такими как циркон и лопарит. Для Ba отмечается более слабая корреляция с указанными металлами и, скорее всего, характерна отдельная минералогическая ассоциация, но со схожими чертами пространственного распределения. Относительно среднего содержания в верхней части континентальной коры, металлы этой группы в среднем демонстрируют отсутствие или незначительную степень обогащенности (EF 1.0–1.5). Однако на разрезе через северную часть Новоземельской впадины до залива Благополучия (станции 10, 11, 47), и в осадках залива Цивольки (ст. 59) фиксируется умеренная обогащенность осадков Zr и Nb (EF до 5), а также повышенное содержание других металлов этой геохимической ассоциации. В качестве источников редких литофильных металлов в осадках Новоземельской впадины и заливов Новой Земли могут считаться раннемезозойские диориты и граниты Новой Земли, для которых характерно акцессорное включение тяжелых минералов, таких как циркон [2].

Третья компонента (12.3% дисперсии данных) объединяет Mn, Mo, Sb, и Ti с достоверной факторной нагрузкой (>0.7), а также Li с максимальной, но недостоверной нагрузкой фактора (0.6). Поведение данных элементов в

осадках Карского моря контролируется осаждением окси-гидроксидов Mn, которые формируются в окисленных поверхностных осадках арктических морей при окислении диффузных потоков восстановленного Mn из нижележащих горизонтов в условиях низких скоростей осадконакопления и незначительного потока органического вещества [3]. При этом элементы группы Mn отличаются высокой степенью обогащенности в осадках Карского моря. Коэффициент обогащения для Mn, Mo и Sb превышает значение 3 на большинстве станций, особенно в западной части Карского моря (станции 5, 8, 7441, 7444, 7451). Максимальное значение EF зарегистрировано на ст. 7441 в Пухучанской впадине и достигает для Mo значения 182, для Mn – 158, для Sb – 20, а для Tl и Li – 5, что подтверждается обнаружением в этих осадках россыпей железомарганцевых конкреций (ЖМК), а также микроконкреций в промывках алевритово-песчаной фракции осадка [2]. Интересно заметить, что в осадках Карского моря влияние Mn сказывается на достаточно ограниченном перечне элементов, хотя сорбция на окси-гидроксидах Mn является свойственной характеристикой для многих микроэлементов. Ранее А.Г. Розановым [3] отмечалось, что для ЖМК Карского моря свойственны довольно низкие концентрации рудных, редких и рассеянных элементов, в отличие от океанических ЖМК.

В четвертую ассоциацию (6.7% дисперсии данных) входят V, Fe, Ni, As, Cs, Pb, Bi, а также Be, Cr, Co, W с максимальной, но недостоверной факторной нагрузкой. С одной стороны, данная группа элементов может быть связана с осаждением в осадках окси-гидроксидов Fe. Однако, в отличие от Mn, железо не демонстрирует обогащенности в осадках Карского моря. Максимальный EF для Fe выявлен на ст. 8 и составляет 2.4, т.е. показывает незначительную обогащенность. На этой же станции установлена максимальная обогащенность осадков V (EF 5.5), Cr (EF 2), Co (EF 3.4), Ni (EF 2.6), As (EF 33.5), Cs (EF 1.3), Pb (EF 2.2) и Bi (EF 3.9). Дело в том, что участие Fe в осадконакоплении Карского моря представлено существенной долей малоподвижных литогенных форм по сравнению с Mn [3]. По-видимому, некоторые металлы литогенного типа распределения (Be, Cr, Cs и W) могут быть связаны с Fe через их нахождение в кристаллических оксидах Fe или железистых алюмосиликатах. Отличительны и особенности пространственного распределения элементов группы Fe от элементов группы Mn. Только на станциях 5 и 8 наблюдается повышенное содержание элементов обеих ассоциаций, тогда как для Fe и родственных металлов выделяются области повышенного содержания на станциях 41, 44 (обе в желобе Святой Анны), 59 (зал. Цивольки) и некоторых станциях западнее п-ва Ямал (7440 и 7453).

Пятая компонента, составляющая всего 3.8% общей дисперсии данных, отражает только вариативность  $C_{орг}$  в осадках Карского моря. При этом ни один из исследуемых элементов не показывает корреляционную связь с

органическим углеродом, который отмечается низким содержанием в осадках Карского моря (0.1–1.95%).

В заключении можно подчеркнуть, что вариативность микроэлементного состава донных отложений Карского моря в основном зависит от распределения различных классов минералов, связанных с разнообразными источниками сноса терригенного материала в этот водоем. По данным РСА анализа, гидрогенные процессы, такие как аутигенное минералообразование и формирование органического вещества, контролируют менее 25% вариативности микроэлементного состава донных отложений Карского моря. Среди них выделяется процесс осаждения оксигидроксилов Mn, который приводит к чрезмерно высокому содержанию Mn, Mo и Sb в осадках некоторых районов западной части Карского моря.

Авторы благодарят М.В. Флинта и М.Д. Кравчишину за организацию экспедиций в Карское море, а также Н.В. Лобуса за отбор и предоставление проб осадков из рейса 2014 г. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-17-00334).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю. Распределение разностей терригенных донных осадков в западной части Карского моря по геохимическим признакам // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 3. С. 98–105.
2. Маслов А.В., Стародымова Д.П., Мигдисова И.А. и др. Литологические особенности алевритово-пелитовых поверхностных донных отложений юго-запада Карского моря // Литология и полезные ископаемые. 2025. № 1. С. 31–48.
3. Розанов А.Г. Геохимия донных отложений Карского моря к западу от полуострова Ямал // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 291–300.
4. Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю. Экосистемы морей Сибирской Арктики – 2019: Весенние процессы в Карском море // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 154–157.
5. Li J., Bai T., Hu W. et al. Geochemical properties and mineralization of thorium // Ore and Energy Resource Geology. 2025. V. 18. 100081.
6. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // The Crust. Treatise on Geochemistry. V. 3 / Rudnick R.L. (Ed.). Elsevier, 2003. P. 1–64.
7. Wise M.A. Trace element chemistry of lithium-rich micas from rare-element granitic pegmatites // Mineralogy and Petrology. 1995. V. 55. P. 203–215.

The distribution of 41 trace elements and organic carbon in surface sediments from different areas of the Kara Sea is presented. Five geochemical associations of elements are identified, primarily related to the composition of lithogenic material and, to a lesser extent, to hydrogen processes (autigenic mineral formation and organic matter productivity) in the sediments of the Kara Sea.

**Виноградова Е.Л.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, e-mail: [vinogradova@ocean.ru](mailto:vinogradova@ocean.ru))

## **Особенности поступления метана в подповерхностные воды и его распространения над Сибирскими окраинами Северного Ледовитого океана**

**Vinogradova E.L.**

(Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science)

## **Features of the entering and distribution of methane in subsurface waters over the Siberian Arctic continental margin**

Ключевые слова: растворенный метан, Евразийский склон Северного Ледовитого океана

Представлены особенности механизмов сезонного поступления шельфового метана ( $\text{CH}_4$ ) в поверхностные/подповерхностные воды и его распространения на внешнем шельфе, шельф-брейке и континентальном склоне морей Лаптевых и Восточносибирского, обусловленные спецификой гидрологических режимов. Показан его потенциальный вклад общий баланс в Северном Ледовитом океане.

Предыдущие исследования растворенного метана ( $\text{CH}_4$ ) в водах над внешними континентальными окраинами евразийского сектора Северного Ледовитого океана (СЛО) выявили механизмы поступления газа в поверхностные/подповерхностные воды в результате: факельных выбросов и усиленных диффузных просачиваний со дна [1–3], контролируемых в значительной степени сезонной спецификой гидрологических режимов [4], и ледовой разгрузки шельфового  $\text{CH}_4$  [5–7].  $\text{CH}_4$ , не достигший атмосферы формирует мощные подповерхностные плюмы, дальнейшая судьба которых контролируется динамикой гидрологических режимов. Распространение  $\text{CH}_4$ -плюмов на внешних Сибирских окраинах СЛО, как и механизмы их формирования, характеризуется региональными особенностями.

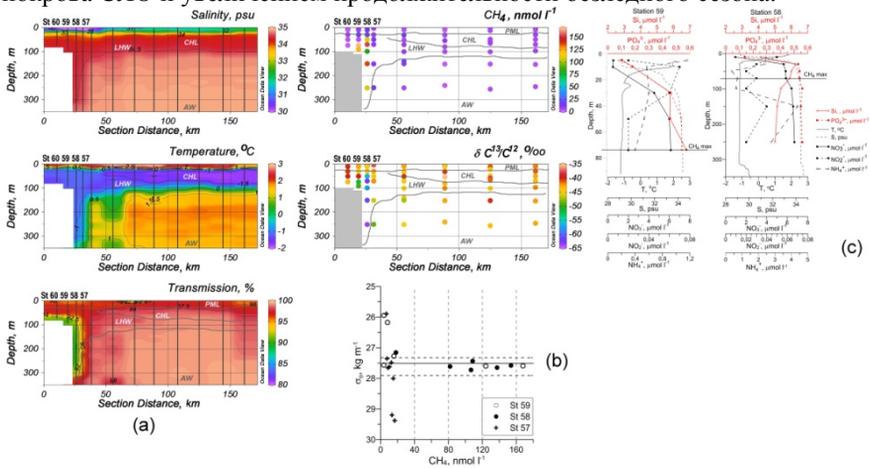
Исследования базируются на данных полученных в рейсах НИС “Академик Федоров” в августе-сентябре, 2013 г.; НИС “Академик Трешников” в 2018 г. в рамках проекта NABOS II (Nansen and Amundsen Basins Observational System II) в морях Лаптевых и Восточносибирском; НИС “Поларштерн” в 2015 г. (TransArc ii, PS94) в центральные районы СЛО.

Обособленные плюмы  $\text{CH}_4$ , ограниченные стратификацией, локализованные в подповерхностных слоях поверхностных арктических вод, регистрируемые в 2013, 2018 гг. в мористом секторе моря Лаптевых и в Восточно-Сибирском море (рис. 1), были сформированы в результате разгрузки шельфового  $\text{CH}_4$  в процессе сезонного таяния льда, образованного в районе полыньи в море Лаптевых и вынесенного в бассейн СЛО системой трансполярного ледового переноса (ТЛП). Формирование

льда в полынье зимой сопровождается переохлаждением поверхностных вод и выделением рассола в течение нескольких месяцев, что создает конвекцию, достигающую дна на мелководном шельфе. Усиленная турбулентность инициирует придонное взмучивание, способствуя высвобождению газа из газонасыщенных осадков. Конвективное перемешивание обеспечивает и быстрый перенос выделившегося  $\text{CH}_4$  к поверхности, где он захватывается формирующимся льдом. При таянии льда в высоких широтах сначала выделяется растворенный в плотном рассоле  $\text{CH}_4$ , (вследствие гравитационного дренажа) увеличивая насыщение им поверхностных вод. На поздней стадии таяния льда, пресная вода ледовой матрицы разбавляет избыток газа на поверхности, и, быстро прогреваясь, формирует стратификацию, удерживая газ в подповерхностных водах верхнего перемешанного слоя. В 2013 г. в море Лаптевых регистрировались интрузии подобных плумов в подстилающие воды холодного галоклина [7], предположительно инициированные вероятным формированием мезомасштабных вихрей в районах ледовой кромки. Проникновение мощных  $\text{CH}_4$ -плумов в воды холодного галоклина отмечалось и в покрытом льдом центральном бассейне, ограниченное глубиной погружения холодного плотного перемешанного слоя [5, 6]. Шельфовый  $\text{CH}_4$  ледовой разгрузки не обнаруживался в постилающих водах нижнего галоклина. Наблюдаемое растущее сезонное сокращение льда в Арктике может изолировать насыщенный шельфовым  $\text{CH}_4$  лед от ТЛП, оставляя его в пределах Сибирских окраин СЛО, инициируя замкнутый в их пределах цикл  $\text{CH}_4$ , т.е. поглощение метана льдом осенью и зимой, и выделение газа *in situ* во время весеннего таяния льда, способствуя его выделению в атмосферу осенью в период выхолаживания поверхностных вод и штормов может происходить в обозримом будущем здесь же.

Мощный, ограниченный стратификацией, плум с содержанием был зафиксирован на глубинах 50–250 м в холодных и соленых промежуточных водах (идентифицированными как воды нижнего галоклина) над шельф-брейком в свободной ото льда центральной части моря Лаптевых (Рисунок 1) в 2018 г. Прилегающий район внешнего шельфа отличается высокой газонасыщенностью осадков с множеством зафиксированных метановых сипов. Изотопный состав углерода  $\text{CH}_4$  указывает на биогенное происхождение газа, а его обогащение легким  $^{12}\text{C}$  сопровождается снижением концентраций ( $R_{\text{square}}=0.68$ ) иллюстрирует текущие окисление  $\text{CH}_4$  и растворение окружающими водами. С севера плум ограничивался атлантическими водами, определяющими его распространение на восток. Примечательно, что плум был обнаружен в мутных водах промежуточного нефелоидного слоя, сформированного в результате изопикнического вторжения отделившегося придонного нефелоидного слоя, переносящего взвесь с внешнего шельфа [8]. Слой характеризовался усиленными

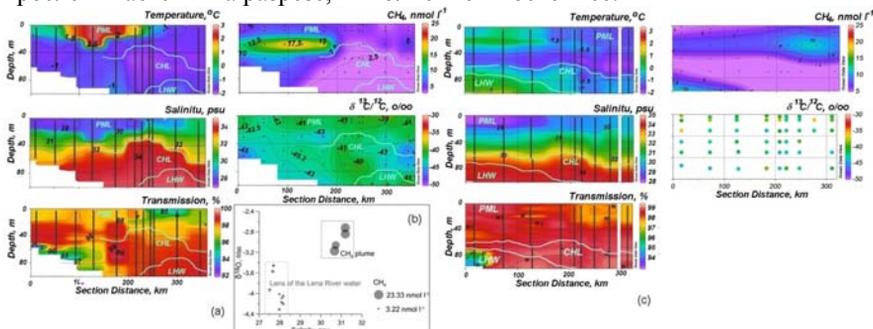
нисходящим потоком и скоростями турбулентной диссипации [8]. Интенсивная турбулентность в придонных водах способствовала взмучиванию рыхлых осадков и выделению  $\text{CH}_4$  со дна на внешнем шельфе. Течения обеспечили быстрый латеральный перенос газа по изопикнам на шельф-брейк. В описанных ранее локациях пузырьковых просачиваний газа в районе исследования, придонные воды не отличались повышенной мутностью [1]. Наличие взвеси и специфичный характер ее распределения в водах плюма [8] отражалось и в характере распределения биогенов по глубине на станциях плюма (Рисунок 1с). Описанные события, были инициированы воздействием нестационарной подветренной волны [8]. Они случайны, локальны и происходят в безледный сезон, однако их значимость существенно возрастает с сезонным сокращением ледяного покрова СЛО и увеличением продолжительности безледного сезона.



**Рис. 1.** (а) Профили температуры, солёности, мутности, концентрации  $\text{CH}_4$  и изотопного состава углерода  $\text{CH}_4$  ( $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) в верхних 350 м в центральном районе моря Лаптевых. Профили начинаются с южных станций. Голубыми линиями ограничены полярные арктические воды (PML), воды холодного галоклина (CHL), воды нижнего галоклина (LHW), и воды Атлантики (AW). (б) Распределение метана по плотности в ядре плюма. (с) Распределение биогенов в плюме.

Иначе выглядят плюмы в большей частью покрытом льдом западном секторе внешнего шельфа и континентального склона в Восточносибирском море (рис. 2). Зарегистрированный на западном разрезе в верхних слоях холодного галоклина в 2018 г.  $\text{CH}_4$ -плюм был изолирован от поверхностных вод мощной линзой Ленских вод, способствующей сохранности (и текущему окислению) газа в промежуточных водах. Обнаруженный  $\text{CH}_4$  был внесен шельфовыми водами моря Лаптевых, питающими

поверхностные воды промежуточных вод холодного галоклина [8]. Плюм прослеживается и на разрезе, выполненном восточнее.



**Рис. 2.** Профили температуры, солёности, мутности, концентрации CH<sub>4</sub> и изотопного состава углерода CH<sub>4</sub> (δ<sup>13</sup>C/12C) в верхних 100 м в западном секторе Восточно-Сибирского моря в 2018 г.: (a) западный разрез (155–160° в.д.), (c) разрез, расположенный восточнее (165–170° в.д.). Профили начинаются с южных станций. Голубыми линиями ограничены полярные арктические воды (PML), воды холодного галоклина (CHL), воды нижнего галоклина (LHW). (b) Соотношение изотопного состава кислорода и солёности в поверхностных/подповерхностных водах.

Анализ многочисленных плюмов CH<sub>4</sub>, позволяет заключить, что перенос CH<sub>4</sub> с шельфа сибирских морей в составе морского льда и подповерхностных промежуточных вод является основным механизмом поставки этого парникового газа в бассейн СЛО, на порядки превышающими его возможную продукцию *in situ*. Изолированность CH<sub>4</sub> в подповерхностных промежуточных водах предполагает его накопление, перенос в центральный бассейн и пролив Фрама, потенциальное сезонное выделение в атмосферу, и преимущественное окисление в водной толще.

Автор признательна коллегам из Института полярных исследований им. Альфреда Вегенера (г. Потсдам): Э. Дамм, Б. Раёз за помощь в получении и обработке интерпретируемых данных. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания в рамках НИР: FMWE-2024-0019.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kravchishina M., Lein A., Flint M. et al. Methane-Derived Authigenic Carbonates on the Seafloor of the Laptev Sea Shelf // *Frontiers in Mar. Sci.* 2021. V. 8. 690304. doi: 10.3389/fmars.2021.690304.
2. Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna // *Geo-Marine Letters.* 2020. V. 40. P. 541–557. doi.10.1007/s00367-020-00655-7.

3. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // *Earth, Atmospheric, and Planetary Science*. 2021. V. 118 (10). e2019672118. doi:10.1073/pnas.2019672118.
4. Damm E., Mackensena A., Buderusa G. et al. Pathways of methane in seawater: Plume spreading in an Arctic shelf environment (SW-Spitsbergen) // *Cont. Shelf Res.* 2005. V. 25. P. 1453–1472. doi:10.1016/j.csr.2005.03.003.
5. Damm E., Rudels B., Schauer U. et al. Methane excess in Arctic surface water-triggered by sea ice formation and melting // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. 16179. doi:10.1038/srep16179.
6. Damm E., Bauch D., Krumpfen et al. The Transpolar Drift conveys methane from the Siberian Shelf to the central Arctic Ocean // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. 4515. doi:10.1038/s41598-018-22801-z.
7. Vinogradova E., Damm E., Pnyushkov A.V. et al. Shelf-Sourced Methane in Surface Seawater at the Eurasian Continental Slope (Arctic Ocean) // *Frontiers in Environ. Sci.* 2022. V. 10. 811375. doi:10.3389/fenvs.2022.811375.
8. Schulz K., Buttner S., Rogge A. et al. Turbulent mixing and the formation of an intermediate nepheloid layer above the Siberian continental shelf break // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. e2021GL092988. doi:10.1029/2021GL092988.
8. Bauch D., Rutgers van der Loeff M., Andersen N. et al. Origin of freshwater and polynya water in the Arctic Ocean halocline in summer // *Progress in Oceanography*. 2007. V. 91. P. 482–495. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.017.

The features of the seasonal influx mechanisms of shelf methane into surface/subsurface waters and its distribution on the outer shelf, shelf-break and continental slope of the Arctic Eurasian margins are presented. The entering of shelf-CH<sub>4</sub> in the water column as well its further fate is mainly controlled by the seasonal specificity of hydrological regimes.

**Гарькуша Д.Н.<sup>1,2</sup>, Косолапов А.Е.<sup>1</sup>, Федоров Ю.А.<sup>1,2</sup>,  
Усова Е.В.<sup>1</sup>, Беляев А.И.<sup>3</sup>, Дмитрик Л.Ю.<sup>1</sup>, Анпилова Е.Л.<sup>1</sup>,  
Верещагин М.А.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, e-mail: gardim@sfedu.ru; <sup>2</sup>Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону; <sup>3</sup>Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград)

**Результаты факторного анализа по выявлению основных показателей и процессов, контролирующих распределение**

**метана в водной толще Цимлянского водохранилища**

**Gar'kusha D.N.<sup>1,2</sup>, Kosolapova A.E.<sup>1</sup>, Fedorov Yu.A.<sup>1,2</sup>,  
Usova E.V.<sup>1</sup>, Belyaev A.I.<sup>3</sup>, Dmitrik L.Yu.<sup>1</sup>, Anpilova E.L.<sup>1</sup>,  
Vereshchagin M.A.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don; <sup>2</sup>Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don; <sup>3</sup>Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Federation Academy of Sciences, Volgograd)

**The results of a factor analysis to identify the main indicators and processes controlling the distribution of methane in the water column of the Tsimlyansk reservoir**

Ключевые слова: искусственные водоемы, вода, парниковые газы, корреляционный анализ, гидрохимические показатели

На сети станций карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» в различные гидрологические фазы проведены исследования, одной из задач которых являлось выявление основных факторов, определяющих пространственно-временное распределение концентраций  $\text{CH}_4$  в воде Цимлянского водохранилища. В настоящей работе представлены результаты факторного анализа полученных данных.

В 2024 г. на базе ФГБУ РосНИИВХ и ФНЦ агроэкологии РАН при научном сопровождении ЮФУ и МГУ создан первый в России пресноводный карбоновый полигон «Цимлянское водохранилище». Одной из задач создания карбонового полигона является выявление основных факторов, обуславливающих пространственное и временное распределение концентраций  $\text{CH}_4$  в воде Цимлянского водохранилища. Для решения этой задачи в различные гидрологические фазы (в период весеннего перемешивания в условиях максимального притока воды в водохранилище; в начале периода летней стратификации при максимальном уровне воды в водохранилище; в период летней стратификации; в конце периода летней стратификации – начале осеннего перемешивания и в период осеннего

перемешивания) проведены экспедиционные исследования на 20 станциях (см. схему в [1]), расположенных на основных участках – плесах Цимлянского водохранилища и в нижнем бьефе Цимлянского гидроузла.

Пробы воды на большинстве станций отбирались в поверхностном и придонном слоях, на глубоководных станциях с глубинами более 10 м пробы отобраны также и с промежуточных горизонтов. В воде контролировались температура, цветность, прозрачность, pH, количество взвешенных веществ, электропроводность, концентрации  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , общего углерода (ОУ), общего неорганического углерода (ОНУ) и растворенного органического углерода (РОУ), величины ХПК и БПК<sub>5</sub>. По разности между концентрациями ОУ и ОНУ рассчитывались концентрации общего органического углерода (ООУ), а по разности ООУ и РОУ – концентрации взвешенного органического углерода (ВОУ). В верхнем 0–5 см слое отложений определялась массовая доля  $\text{CH}_4$ . На всех станциях измерялась глубина. Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение  $\text{CH}_4$  и других гидрохимических показателей выполнено стандартными методами согласно ГОСТ 31958-2012, ГОСТ Р 59024-2020, ПНДФ 12.1:2.2:2.3:3.2-03, РД 52.24.512-2012, РД 52.24.511-2013, РД 52.24.468-2019 и др.

Корреляционный анализ показал, что во все периоды исследований, за исключением июля 2024 г., наблюдалась обратная связь разной степени тесноты между концентрациями  $\text{CH}_4$  в поверхностном и придонном слоях воды Цимлянского водохранилища, с одной стороны, и глубиной станций, с другой. Поскольку основным источником  $\text{CH}_4$  в нормально аэрируемых водных экосистемах, к каковым относится и изучаемое водохранилище, являются донные осадки [2, 3], то в увеличивающемся с глубиной объеме воды за счет процессов растворения и окисления происходит “разубоживание” концентраций  $\text{CH}_4$ , поступающего из отложений.

Относительно невысокие коэффициенты корреляции, показывающие в большинстве периодов исследования слабую прямую связь между содержаниями  $\text{CH}_4$  в верхнем 0–5 см слое отложений и придонной воде Цимлянского водохранилища, помимо возможной генерации  $\text{CH}_4$  в анаэробных микроразонах водной толщи [2], или его дополнительного поступления в составе притоков, или вод участков, расположенных выше по течению, могут быть обусловлены следующими причинами.

Концентрация  $\text{CH}_4$  в придонной воде того или иного участка акватории, главным образом, зависит от интенсивности его совокупного потока из верхнего слоя отложений этого участка [2, 3]. В свою очередь, совокупный поток  $\text{CH}_4$  из отложений складывается из сумм его локальных (удельных) потоков, величина которых даже на небольшом участке может сильно варьироваться. С одной стороны, это связано, с высокой гетерогенностью распределения  $\text{CH}_4$  в верхних слоях отложений пресных водоемов и водотоков [2], что при малом объеме пробы (1 см<sup>3</sup>), отобранной из них

согласно РД 52.24.511-2013 для последующего анализа, создает проблему ее представительности. С другой стороны, на различных участках, даже при близких содержаниях  $\text{CH}_4$  в верхнем слое осадков, его удельный поток на границе раздела дно–вода может существенно отличаться, что обусловлено особенностями строения донных отложений, как пористой среды, миграция  $\text{CH}_4$  в которой осуществляется через образованные устьями пор каналы [4]. Общая пористость отложений зависит от формы зерен, гранулометрического состава и структуры скелета и, как правило, повышается в ряду пески – алевритовые илы – глинистые илы. В этом же направлении в отложениях увеличивается количество ОВ и снижается Eh, что способствует активизации анаэробных процессов, в том числе образованию  $\text{CH}_4$  [2]. Однако, обладая высокой общей пористостью, тонкодисперсные илы с увеличением в них доли глинистых частиц, вероятно, несколько утрачивают свою проницаемость, что обуславливает накопление в них  $\text{CH}_4$ , вследствие снижения интенсивности диффузионного обмена на границе раздела дно–вода. Уменьшение проницаемости можно объяснить закрытием части пор тонкодисперсным органоминеральным материалом и/или их заполнением связанной водой (адсорбционной, осмотической и капиллярной), что в целом уменьшает эффективную пористость [5]. Вероятно, некоторую роль играет увеличение с глубиной давления водного столба, что способствует «запечатыванию» пор. Сказанное косвенно подтверждается отклонением от общего массива отдельных точек на графиках, демонстрирующих зависимость между содержаниями  $\text{CH}_4$  в 0–5 см слое осадков и в придонной воде Цимлянского водохранилища в августе 2023 г., мае и сентябре 2024 г. Этим точкам, как правило, соответствуют содержания  $\text{CH}_4$  на станциях, приуроченных к глубоким участкам Приплотинного и Центрального плесов водохранилища, где отлагаются алевритоглинистые и глинистые илы, для которых обычно характерны высокие содержания  $\text{CH}_4$ . При этом его концентрации в придонной воде на этих станциях были относительно низкими. Указанный механизм, наряду с процессами растворения и окисления  $\text{CH}_4$  в воде, может являться дополнительной причиной снижения его содержания в водной толще при увеличении глубины водохранилища.

В большинство периодов экспедиционных исследований в поверхностном слое воды наблюдаются прямые связи разной степени тесноты между концентрациями  $\text{CH}_4$ , с одной стороны, и концентрациями ООУ, ОНУ, их сумм (ОУ), а также РОУ и ВОУ, с другой. Анализ данных показывает, что наблюдаемые прямые зависимости в аэробной (большую часть года) толще воды Цимлянского водохранилища являются следствием не непосредственной генерации  $\text{CH}_4$  в анаэробных микрозонах его водной толщи, а обусловлены не связанным напрямую друг с другом снижением концентраций  $\text{CH}_4$  и вышеперечисленных показателей в поверхностной и придонной воде при удалении от берегов и от Верхнего к Приплотинному

участку, то есть в направлении роста глубин. Об опосредованной связи могут свидетельствовать слабые обратные корреляционные зависимости между  $\text{CH}_4$  и данными показателями в период летней стратификации (июль 2024 г.), когда в придонном слое воды на глубоководных станциях Приплотинного и Центрального участков, вследствие дефицита кислорода сформировались анаэробные условия, явившиеся основной причиной активизации образования  $\text{CH}_4$  в отложениях и увеличения его концентраций в воде у дна. Влияние  $\text{O}_2$  подтверждается существованием в период летней стратификации заметной обратной зависимости между концентрациями  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$  в придонном слое воды ( $r = -0.60$ ,  $P < 0.01$ ). Это опосредованно выражается в наличии сильной прямой связи ( $r = 0.71$ ;  $P < 0.01$ ) между концентрациями  $\text{CH}_4$  в придонной воде и глубиной, хотя во все остальные периоды зависимость его концентраций от глубины носила обратный характер. В то же время между концентрациями в придонной воде  $\text{O}_2$ ,  $\text{ОНУ}$ ,  $\text{ООУ}$  и  $\text{РОУ}$  и глубиной в период летней стратификации наблюдались заметные обратные связи (соответственно  $r = -0.70$ ,  $-0.66$ ,  $-0.59$ ,  $-0.55$ ;  $P < 0.01$ ), а между  $\text{ВОУ}$  и глубиной – слабая незначимая обратная связь ( $r = -0.16$ ;  $P > 0.05$ ), что в целом характерно для поверхностного и придонного слоев воды и в другие периоды исследований.

Причины снижения концентраций  $\text{CH}_4$  в воде водохранилища при увеличении глубины станций отбора проб рассмотрены выше. Уменьшение концентраций  $\text{O}_2$ ,  $\text{ООУ}$ ,  $\text{ОНУ}$ ,  $\text{РОУ}$  и  $\text{ВОУ}$  с глубиной, наряду с процессами их окисления в водной толще и осаждения в составе органоминеральной взвеси на поверхность отложений, связано с удалением от основных источников их поступления, каковыми являются воды р. Дон и притоков, а также прибрежных зон водохранилища, в воде которых происходит интенсивное продуцирование  $\text{O}_2$  фитопланктоном в процессе фотосинтеза. Снижение интенсивности образования  $\text{O}_2$  при удалении от берегов, а также от Верхнего (мелководного) участка к Приплотинному (глубокому) участку, вероятно, обусловлено уменьшением содержания фосфорных соединений, что подтверждается имеющимися данными по распределению  $\text{PO}_4^{3-}$  в воде водохранилища. Концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  и, в меньшей степени,  $\text{NO}_3^-$  в большинство периодов наблюдения также снижаются в этих направлениях, поскольку эти соединения, как и  $\text{PO}_4^{3-}$ , являются продуктами минерализации  $\text{O}_2$  в воде, донных осадках и почвах водосбора. Отсутствие в отдельные периоды тенденции к снижению их концентраций при удалении от берегов и от верхней к нижней части водохранилища или даже увеличение концентраций этих соединений в данных направлениях объясняется значимым возрастанием роли отложений глубоководных участков, как источников их поступления. В этом случае теснота корреляционной связи между концентрациями данных соединений и  $\text{CH}_4$  в воде может снижаться или менять свое направление на обратное.

Таким образом, сходный в большинстве периодов наблюдения характер

распределения в воде  $\text{CH}_4$ ,  $\text{OY}$ ,  $\text{OOU}$ ,  $\text{OHY}$ ,  $\text{POY}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  и, в меньшей мере,  $\text{NO}_3^-$  и взвешенных веществ по акватории Цимлянского водохранилища (уменьшение их концентраций с глубиной), во многом обусловленный не связанными напрямую друг с другом причинами, предопределяет наличие прямых связей разной степени тесноты между  $\text{CH}_4$  и данными показателями. В период летней стратификации из-за значительного увеличения количества  $\text{CH}_4$  в придонной воде глубоких участков Приплотинного и Центрального плесов, характер этих зависимостей меняется на обратный. Наблюдаемая во время стратификации прямая связь ( $r = 0.30$ ,  $P > 0.05$ ) между  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{CH}_4$  в придонной воде, вероятно, обусловлена активно протекающими в этот период в анаэробных условиях процессами денитрификации и метаногенеза.

Прямая зависимость прозрачности воды от глубины объясняет существование в большинстве периодов обратной связи между  $\text{CH}_4$  и прозрачностью и прямой связи между ними в период летней стратификации. Закономерное уменьшение температуры поверхностного и придонного слоев воды в апреле, мае, июле и августе при удалении от берегов и от верховья к низовью водохранилища обуславливает наличие в эти периоды прямых зависимостей между температурой воды и концентрациями  $\text{CH}_4$ . И, наоборот, связанное с более быстрым охлаждением мелководных участков увеличение температуры воды в сентябре и октябре в указанных направлениях предопределяет существование обратной связи между данными показателями. Соотношение интенсивностей процессов образования и распада органических и неорганических веществ, сопряженно протекающих в водных экосистемах, во многом определяет, как изменение содержаний  $\text{CH}_4$  и величин pH, так и характер связи между ними [2].

Работа выполнена в рамках создания и функционирования карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» М7.7/08-18-24.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е. и др. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–72.
2. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2021. 366 с.
3. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Косолапов А.Е. и др. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 37–50.
4. Мизандронцев И.Б. Микрокинетика процессов и химический обмен в

системе вода – дно. Автореф. дисс. ... д.г.н. Ростов-н/Д, 1997. 40 с.

5. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. ак. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.

At the Tsimlyanskoye Reservoir carbon landfill station network, studies were conducted in various hydrological phases, one of the tasks of which was to identify the main factors controlling the spatiotemporal distribution of CH<sub>4</sub> in the water of the Tsimlyanskoye reservoir. This paper presents the results of a factor analysis of the data obtained.

**Гринько А.А.<sup>1</sup>, Гершелис Е.В.<sup>1</sup>, Спивак Э.А.<sup>2</sup>, Дударев О.В.<sup>2</sup>, Семилетов И.П.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Научно-технологический университет «Сириус», ФТ Сириус, e-mail: [info@siriusuniversity.ru](mailto:info@siriusuniversity.ru); <sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН)

## **Органическое вещество взвешенного надосадочного материала Карского моря**

**Grinko A.A.<sup>1</sup>, Gershelis E.V.<sup>1</sup>, Spivak E.A.<sup>2</sup>, Dudarev O.V.<sup>2</sup>, Semiletov I.P.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sirius University of Science and Technology, FT Sirius; <sup>2</sup>V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS)

## **Organic matter in suspended sediments from the Kara Sea**

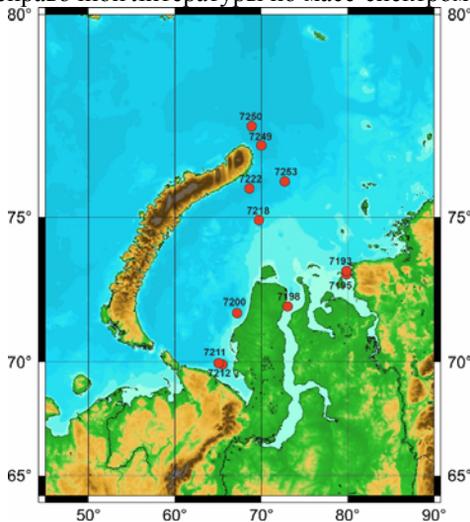
Ключевые слова: взвесь, донные осадки, Карское море, наилок, органическое вещество

Исследование взвешенного вещества, концентрирующегося в зоне непосредственно над донными осадками, позволяет регистрировать обменные процессы в системе придонная вода–взвесь–донный осадок. В надосадочном материале, отобранном в ходе экспедиции в Карское море (2021 г.) исследовался состав органического вещества. Показана пространственная неоднородность состава органического вещества от Байдарачкой губы, Обской губы и устья Енисея до побережья Новой Земли.

Взвешенный материал играет значимую роль в транспорте минеральных и органических веществ в морской экосистеме [1, 2]. В ходе выполнения комплексных исследований в составе морской экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море (рейс АМК-86, 2021 г.) был отобран и проанализирован взвешенный надосадочный материал (ВНМ). Проводилось детальное изучение органического вещества (ОВ), концентрирующегося в данном слое, располагающемся непосредственно над донным осадком. Полученные данные усилят понимание обменных процессов в системе придонная вода–взвесь–осадок [3–5]. Положение выполненных станций в ходе рейса АМК-86 станций показано на рис. 1.

Материал отбирался при помощи мультикорера с борта научно-исследовательского судна. Производился слив надосадочного водного слоя из трубок мультикорера. Затем данный слой (объем 1 л и более) фильтровался через стекловолоконные фильтры 0.7 мкм на вакуумной фильтрационной установке. Выделение ОВ проводилось экстракцией смесью  $\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{CH}_3\text{OH}$  соотношении 2:1 (об.) в аппарате Сокслета в течение суток. Анализ ОВ выполнялся на системе газовый хроматограф–масс-спектрометр Agilent 7890 B (GC) – 7200 QTOF (MS). Хроматографическая колонка DB-5 ms (30 м x 250 мкм x 0.25 мкм), температурная программа

анализа: старт нагрева 40°C, нагрев 5°C/мин до 150°C, далее 3°C/мин до 310°C, выдержка при 310°C – 20 мин. Температура испарителя – 310°C, температура ионного источника – 230°C, температура переходной линии – 280°C. Идентификация компонентов осуществлялась по масс-спектрометрическим библиотекам NIST 17, а также по детальному изучению масс-спектра осколочных и молекулярных ионов с использованием справочной литературы по масс-спектрометрии.



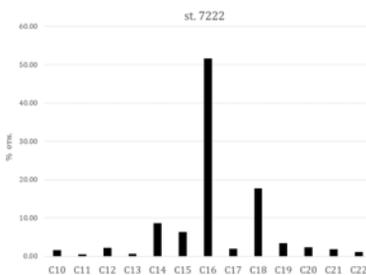
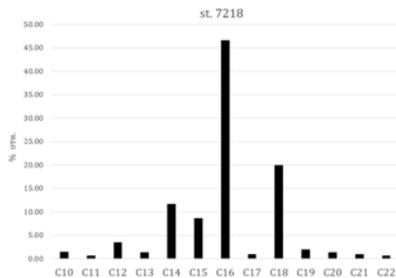
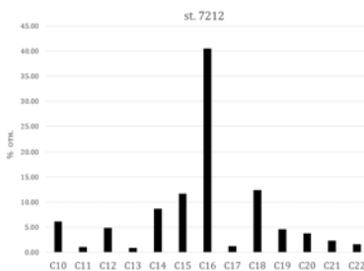
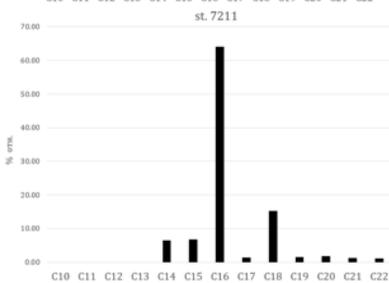
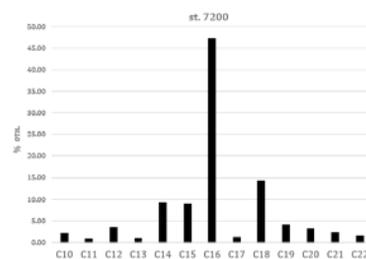
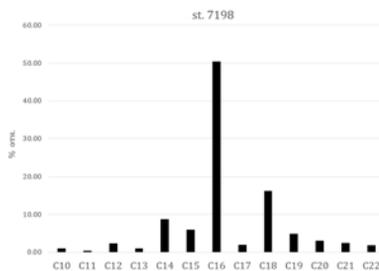
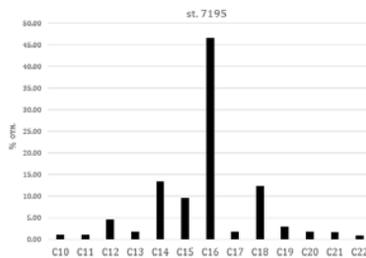
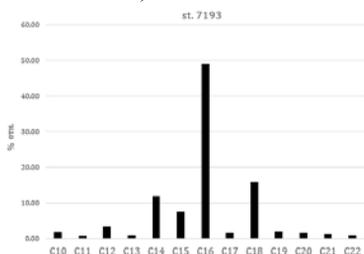
**Рис. 1.** Схема расположения океанографических станций и мест отбора проб.

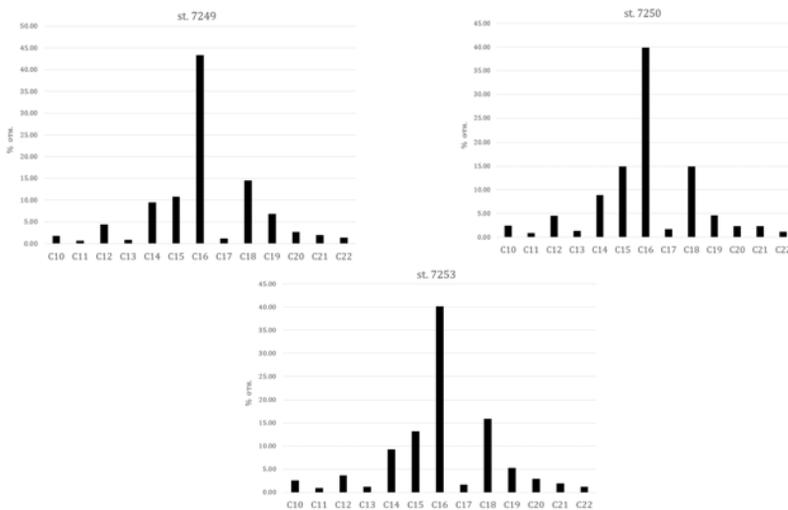
Основными компонентами ОБ во ВНМ являлись н-алканы и н-жирные кислоты. Молекулярно-массовое распределение (ММР) н-алканов было подробно исследовано в работе [6]. В данной работе было проанализировано ММР жирных кислот (рис. 2), а также другие классы органических соединений. На всех станциях отбора проб в составе жирных кислот преобладают  $C_{16}$ -кислота и  $C_{18}$ -кислоты. Тем не менее, на станциях 7250, 7253, 7212 менее заметно терригенное влияние, что прослеживается как по индексам на основе ММР н-алканов, так и жирных кислот. В тоже время индекс ACL для всех станций отображает смешанный генезис поступающего ОБ (см. таблица).

Среди ароматических компонентов были обнаружены голяядерный фенантрен и его C1-гомологи практически на всех станциях пробоотбора.

Важным фактом является то, что в составе ОБ взвешенного вещества были обнаружены минорные количества тритерпеноидных компонентов ( $C_{28}$  бисноргопан,  $C_{29}$  норгопан) и их производных, в то же время на прибрежных станциях, приуроченных к устью рек и Байдарацкой губе, а

также ст. 7218, были обнаружены стеролы (производные холестерина, холестанола).





**Рис. 2.** ММР жирных кислот ОВ ВМ.

Таблица. Параметры ММР n-алканов и жирных кислот.

N	Образец	Параметры ММР n-алканов		Параметры ММР жирных кислот	
		$CPI_{alk}$	TAR	$CPI_{fa}$	ACL
1	7193	0.96	0.29	5.73	16.0
2	7195	1.23	0.31	4.25	15.8
3	7198	1.55	5.32	5.09	16.4
4	7200	1.28	0.22	4.43	16.1
5	7211	1.49	6.96	8.11	16.4
6	7212	1.17	0.62	3.57	15.8
7	7218	1.62	0.47	5.81	16.0
8	7222	1.44	0.37	5.83	16.3
9	7249	1.25	1.27	3.49	16.2
10	7250	0.64	0.04	2.88	16.0
11	7253	1.46	0.11	3.14	16.1

Взвешенные вещества являются своеобразной «кровеносной системой» моря, обеспечивающей транспорт веществ и связь между различными компонентами морской среды. Их изучение, в том числе углубленное исследование ОВ, сосредотачивающегося в них, позволит глубже понять не только текущее состояние экосистемы, но и предсказать ее будущее в условиях изменения климата и антропогенного воздействия. В этой связи особенно важно учитывать роль взвешенных веществ в глобальном углеродном цикле и секвестрации углерода.

Результаты получены при финансовой поддержке исследования, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологический Атлас. Карское море. М.: Арктический научный центр, Роснефть, 2016.
2. Колтовская Е.В., Немировская И.А. Распределение взвешенного вещества и углеводов в морях Карском и Лаптевых в августе–сентябре 2018 года // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 1. С. 81–94.
3. Беляев Н.А., Пересыпкин В.И., Поняев М.С. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
4. Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 563–576.
5. Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Федулов В.Ю., Пушкарева Е.М. Гранулометрический состав, органический углерод и геохимические маркеры в поверхностном слое донных осадков северо-восточной части Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 354–363.
6. Гринько А.А., Гершелис Е.В., Спивак Э.А. и др. Характеристика органического вещества надосадочного взвешенного материала Карского моря (Экспедиция 2021) // Сб. трудов XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU-2024. Том II (IV). С. 357.

Studying the concentration of suspended matter in the zone immediately above the bottom sediments enables us to record the exchange processes occurring in the bottom water-suspension-sediment system. The composition of the organic matter in the suspended material (silt deposit) collected during the 2021 expedition to the Kara Sea was analysed. Spatial heterogeneity in the composition of the organic matter was demonstrated from Baydaratskaya Bay and the Gulf of Ob to the Yenisei River mouth and the coast of Novaya Zemlya.

**Гуров К.И., Медведев Е.В., Мукосеев И.Н., Орехова Н.А.**

(Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, e-mail:

[gurovki@gmail.com](mailto:gurovki@gmail.com))

## **Характеристики поровых вод донных отложений на участке Южного берега Крыма**

**Gurov K.I., Medvedev E.V., Mukoseev I.N., Orekhova N.A.**

(Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol)

## **Characteristics of bottom sediments pore waters in the area of the Southern coast of Crimea**

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, растворенный неорганический углерод, поток  $\text{TCO}_2$ , карбонатная система, Черное море

Исследована пространственная изменчивость окислительно-восстановительных условий в донных отложениях Южного берега Крыма и Феодосийского залива. Получены количественные характеристики и особенности пространственного распределения в поровых водах поверхностного слоя отложений параметров карбонатной системы. Выявлены связи параметров химического состава поровых вод с физико-химическими характеристиками твердой фазы донных отложений. На основе полученных данных установлено, что в поверхностном слое донных отложений развиваются преимущественно слабощелочные восстановительные условия, окислительные условия наблюдаются на отдельных станциях к югу от Лименской бухты и вблизи м. Меганом. Показано, что поток  $\text{TCO}_2$  преимущественно направлен из донных отложений в придонный слой вод (средняя величина  $-0.14$  моль/ $\text{м}^2$ ·год).

Прибрежные морские экосистемы можно считать одним из самых продуктивных и биологически богатых районов Мирового океана. Именно они поддерживают высокое биоразнообразие, обеспечивают значительную часть марикультуры и выступают в качестве рекреационных и социально-экономических объектов [1]. Поэтому прибрежные акватории наиболее подвержены антропогенному воздействию, что в свою очередь, усиливает процессы осадконакопления и, в конечном итоге, приводит к деградации прибрежных экосистем.

Параметры карбонатной системы являются удобным индикатором для оценки устойчивости морских экосистем. К одним из основных параметров относятся содержание растворенного неорганического углерода ( $\text{TCO}_2$ ), представляющего сумму концентраций углекислого газа, бикарбонат- и карбонат-ионов, и общая щелочность (TAlk) – как сумма концентраций карбонатов и бикарбонатов с учетом их заряда. Эти параметры являются достаточно консервативными, а изменение одного из них может указывать на деградацию ( $\text{TCO}_2$ ) и возможность к восстановлению (TAlk) экосистемы. Эти параметры тесно связаны с углеродным циклом и кислотно-щелочным балансом водной среды, а их изменения отражают биологическую

продуктивность и могут указывать на антропогенную нагрузку.

Между донными отложениями и водной толщей за счет диффузионных процессов происходит обмен веществом, и формируются потоки, в частности потоки растворенного неорганического углерода. Оценка вклада донных отложений в характеристики придонного слоя вод играет важную роль в изучении регионального цикла углерода, особенно в условиях повышенной антропогенной нагрузки.

Анализ и оценка пространственной изменчивости потоков растворенного неорганического углерода на границе вода–дно особенно актуальны для прибрежных районов Южного берега Крыма, Феодосийского залива и Керченского пролива. Эти акватории подвергаются значительной антропогенной нагрузке, связанной с развитием туризма, сельского хозяйства и промышленности. При этом они характеризуются сложными гидродинамическими условиями и высокой уязвимостью к внешним воздействиям. Понимание особенностей углеродного обмена в этих районах необходимо не только для оценки состояния экосистем, но и прогнозирования их изменений.

Целью исследования является изучение распределения общей щелочности и растворенного неорганического углерода в придонном слое вод и поровых водах донных отложений, оценка потоков  $\text{TCO}_2$  на границе вода–донные отложения, а также их связь с физико-химическими характеристиками твердой фазы донных отложений в прибрежных районах Южного берега Крыма, Феодосийского залива и Керченского пролива. Полученные результаты помогут оценить их устойчивость под влиянием внешних нагрузок.

Отбор проб поверхностного слоя осадков (0–5 см) осуществлялся дночерпателем Петерсона (площадь захвата  $0.038 \text{ м}^2$ ). Гранулометрический анализ проб донных отложений проводился методом декантации и рассеивания (ГОСТ 12536-2014; введен с 01.07.2015 г.). Для разделения и взвешивания крупных фракций (более 0.1–0.05 мм) применялся ситовый метод. Анализ выполнялся с использованием набора сит с отверстиями разного диаметра (10; 7; 5; 2,5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 мм).

Параметры pH и Eh измеряли в свежееотобранных пробах с помощью иономера И-160МИ. Общую щелочность определяли методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием [2]. Определение  $\text{TCO}_2$  проводили на анализаторе неорганического углерода AS-C5M [3].

Полученные величины  $\text{TCO}_2$  поровых вод донных отложений и придонного слоя вод позволили рассчитать его поток, формирующийся на границе сред. Поток  $\text{TCO}_2$  рассчитывался с учетом молекулярной диффузии растворенных соединений и градиента концентраций согласно первому закону Фика [4]:

$$J = -D_s \frac{dc}{dz}$$

где  $J$  – поток, моль/(год·м<sup>2</sup>);  $\phi$  – пористость;  $dC/dZ$  – градиент концентрации, моль/(м<sup>3</sup>·м);  $D_s$  – коэффициент молекулярной диффузии с учетом вязкости, м<sup>2</sup>/год.

$$D_s = \frac{D_0}{\theta}$$

где  $D_0$  – коэффициент молекулярной диффузии воды, м<sup>2</sup>/год;  $\theta$  – вязкость.

Коэффициенты диффузии  $\text{ТСO}_2$  для водной толщи взяты из работы [5] с учетом температурной поправки. Коэффициент молекулярной диффузии поровых вод донных отложений с учетом вязкости рассчитан по уравнению:

$$\theta^2 = 1 - \ln(\phi^2),$$

Отмечено, что для мелководных станций (глубина <120 м) донные отложения представлены серыми илами с включениями песка, ракуши и ракушечного детрита. На станциях в районе Керченского предпроливья и к западу от г. Ялта верхний слой состоит полностью из ракуши и ракушечного детрита. Для проб, отобранных на участках свала глубин (глубина >150 м) и на континентальном склоне (глубина >1000 м) характерны серо-черные, черные, сильно обводненные илы с резким запахом сероводорода и отсутствием включений раковинного материала.

Для прибрежных мелководных участков значения величины  $E_h$  в донных отложениях изменяются в широком диапазоне от +122 до –260 мВ, что указывает на формирование как окислительных, так и восстановительных условий. Такая неоднородность объясняется пространственной изменчивостью содержания органического вещества, типом отложений, степенью их обводненности и долей ракушечного материала

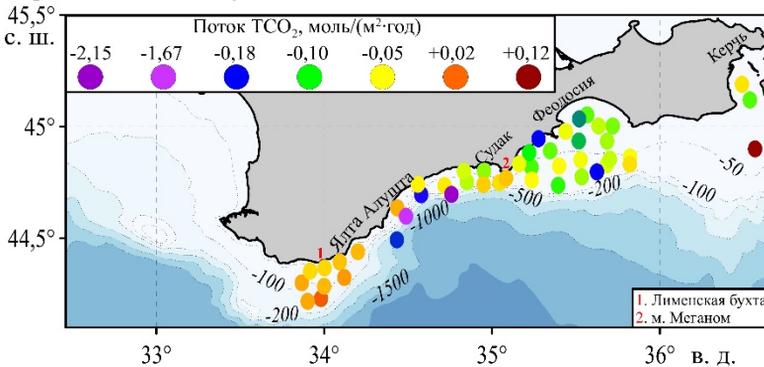
Отмечено, что значения величины общей щелочности в поровых водах изменяются в широком диапазоне от 3.2–4.2 мМ на мелководных станциях до 5.3–12.3 мМ на станциях, расположенных на свале глубин (190–1050 м) при развитии восстановительных условий. Широкая зона распространения низких значений общей щелочности наблюдается в донных отложениях в районе Феодосийского залива, а также к западу от г. Ялта, что объясняется повышенной долей ракушечного материала в пробах, для которых не характерно накопление органического вещества.

Содержание  $\text{ТСO}_2$  изменяется от 2284–3554 мкмоль/кг в мелководных илистых отложениях с включениями песка, ракуши и ракушечного детрита до 6406–12143 мкмоль/кг в отложениях черных илов с выраженным запахом сероводорода, отобранных на глубоководных станциях.

Полученные впервые величины  $\text{ТСO}_2$  в поровых водах донных отложений на мелководных станциях превышают величины, характерные для придонного слоя вод (среднем на 500 мкмоль/кг), а для глубоководных проб превышают в несколько раз. Отмечена средняя отрицательная

линейная корреляционная зависимость ( $r = -0.51$ ,  $n = 52$ ) распределения  $\text{TCO}_2$  от Eh.

Величина потока  $\text{TCO}_2$  изменялась в диапазоне от  $+0.12$  до  $-2.15$  моль/ $(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , среднее значение потока составило  $-0.14$  моль/ $(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Отрицательные величины потока  $\text{TCO}_2$  указывают на то, что он направлен из донных отложений в придонный слой вод. Таким образом, донные отложения в исследуемом районе служат источником растворенного неорганического углерода для водной толщи. Положительные величины потока  $\text{TCO}_2$  отмечены на отдельных станциях в районе Керченского предпроливья и к западу от г. Ялта.



**Рисунок.** Пространственное распределение величины потока  $\text{TCO}_2$  на границе вода–донные отложения

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2025-0001.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуров К.И., Овсяный Е.И., Котельянец Е.А., Коновалов С.К. Геохимические характеристики донных отложений акватории Каламитского залива Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 69–80.
2. Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского, А.М. Черняковой. М.: ИО АН СССР, 1992. 201 с.
3. Хоружий Д.С. Использование приборного комплекса AS-C3 для определения парциального давления углекислого газа и концентрации неорганического углерода в морской воде // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2010. Вып. 23. С. 260–272.
4. Huacinthe C. et al. Early diagenetic processes in the muddy sediments of the Bay of Biscay // Marine Geology. 2001. V. 177. Iss. 1–2. P. 111–128. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00127-X)

5. Zeebe R.E. On the molecular diffusion coefficients of dissolved  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $^{238}\text{CO}_3$  and their dependence on isotopic mass // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011. V. 75. Iss. 9. P. 2483–2498. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.010>

The spatial variability of oxidation-reduction conditions in bottom sediments of the Southern Coast of Crimea and Feodosia Gulf was studied. Quantitative characteristics and features of spatial distribution of carbonate system parameters in pore waters of the surface sediment layer were obtained. Relationships between parameters of chemical composition of pore waters and physicochemical characteristics of the solid phase of bottom sediments were revealed. Based on the obtained data, it was established that predominantly slightly alkaline reducing conditions develop in the surface layer of bottom sediments, oxidizing conditions are observed at individual stations to the south of Limenskaya Bay and near Cape Meganom. It was shown that the  $\text{TCO}_2$  flux is mainly directed from bottom sediments to the bottom water layer (average value  $-0.14 \text{ mol/m}^2\cdot\text{year}$ ).

**Гурова Ю.С., Гуров К.И., Медведев Е.В., Мукосеев И.Н.,  
Орехова Н.А.**

(Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, e-mail: [kurinnaya-jul@yandex.ru](mailto:kurinnaya-jul@yandex.ru))

## **Параметры карбонатной системы донных отложений Севастопольской бухты**

**Gurova Y.S., Gurov K.I., Medvedev E.V., Mukoseev I.N.,  
Orekhova N.A.**

(Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol)

## **Characteristics of the bottom sediments carbonate system in the Sevastopol bay**

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, растворенный неорганический углерод, поток  $\text{TCO}_2$ , карбонатная система, Севастопольская бухта, Черное море

В работе изучен вклад донных отложений Севастопольской бухты в региональный бюджет углерода. А также проанализирована связь потоков  $\text{TCO}_2$  с характеристиками донных отложений. На основе полученных данных установлено, что в поверхностном слое донных отложений бухты развиваются слабощелочные восстановительные условия. Показано, что поток  $\text{TCO}_2$  направлен из донных отложений в придонный слой вод (средняя величина  $-0.16$  моль/ $\text{м}^2$ -год), донные отложения являются источником 14.4 т/год растворенного неорганического углерода.

Севастопольская бухта является полузамкнутой акваторией, испытывающей интенсивную хозяйственную (городские ливневые стоки, портовая деятельность, активное судоходство) и значительную рекреационную нагрузку [1]. Сочетание природных и антропогенных факторов позволяет проводить исследования трансформации форм углерода в условиях интенсивного внешнего воздействия.

Карбонатная система, представляет систему равновесий между угольной кислотой и продуктами ее диссоциации и играет важную роль в регуляции кислотно-основного баланса морских вод и цикла углерода. Одними из основных параметров карбонатной системы, являются растворенный неорганический углерод ( $\text{TCO}_2$ ), представляющий сумму концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , и общая щелочность (TAlk), как суммарная концентрацию всех анионов, способных связывать протоны ( $\text{H}^+$ ). Содержание растворенного неорганического углерода может служить индикатором устойчивости экосистемы к внешним воздействиям, а величина щелочности – отражает буферную емкость системы и свидетельствует о наличии/отсутствии источника гидрокарбонатов, и косвенным образом,  $\text{CO}_2$ .

Одним из продуктов разложения ОВ является  $\text{CO}_2$ . Концентрация  $\text{CO}_2$

определяется влиянием ряда процессов, как физико-химических, так и биологических. Градиент концентраций, определяющий направление потока  $\text{TCO}_2$ , показывает, будут ли донные отложения выступать как источник углерода в прибрежной экосистеме или нет.

Целью работы являлось изучение параметров карбонатной системы и вклада донных отложений в характеристики вод Севастопольской бухты. Полученные данные позволят не только оценить современное состояние экосистемы Севастопольской бухты, но и спрогнозировать ее реакцию на изменение внешних условий, в том числе возникновение дополнительных источников органического вещества и  $\text{CO}_2$ .

Данные были получены в ходе ежеквартальных экспедиций отдела биогеохимии моря Морского гидрофизического института РАН на маломерном судне «Гидрограф-4». Пробы верхнего слоя (0–5 см) донных отложений отбирались с помощью дночерпателя Петерсона, в лаборатории из осадка методом центрифугирования были извлечены поровые воды. Отбор придонного слоя вод осуществлялся с использованием батометра Нискина. Всего в октябре 2024 г. было отобрано 8 проб воды из придонного слоя и донных отложений, а в декабре 2024 г. и апреле 2025 г. – 13 проб.

Измерение величин pH и Eh проводили в свежетоотобранных пробах с помощью иономера И-160МИ. Общую щелочность определяли методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием [2]. Определение  $\text{TCO}_2$  проводили на анализаторе неорганического углерода AS-C5M [3].

Согласно ранее полученным данным [4], в донных отложениях Севастопольской бухты преобладает мелкозернистая фракция (в среднем ~82%), с максимумом в Южной бухте (до 100%). Высокая доля илистого материала коррелирует с повышенным содержанием органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ), максимум которого также отмечен в Южной бухте (до 7%). Это дает основу для формирования слабощелочных восстановительных условий (pH 7.2–8.1, Eh –50...–150 мВ), которые были зафиксированы в поверхностном слое донных отложений. Подобные условия не характерны для открытых районов моря, что указывает на дополнительный вклад антропогенных источников в формирование окислительно-восстановительного режима бухты.

Полученные значения TAlk в поровых водах бухты были высокими (среднее 5.7 мкмоль/кг) и почти в 2 раза превышали щелочность придонного слоя вод. При этом Южная бухта, характеризующаяся наличием на ее берегах ливневых и аварийных выпусков сточных вод, и центральная часть Севастопольской бухты отличались максимальными значениями TAlk – в среднем 7.9 и 6.5 мкмоль/кг соответственно. В свою очередь, в придонном слое вод Севастопольской бухты общая щелочность изменялась равномерно, значения в среднем составили 3.4 мкмоль/кг во все исследованные сезоны.

Пространственная изменчивость концентрации растворенного

неорганического углерода в поровых водах совпадает с распределением общей щелочности. Максимальные концентрации ТСО<sub>2</sub> также отмечены в Южной бухте (среднее 5748 мкмоль/кг) и в центральной части Севастопольской бухты (среднее 6850 мкмоль/кг). В придонном слое вод средние значения ТСО<sub>2</sub> были значительно ниже, их средняя концентрация составила 3000 мкмоль/кг.

Полученные величины параметров карбонатной системы поровых вод позволили рассчитать поток ТСО<sub>2</sub> на границе раздела вода – донные отложения. Для этого были использованы данные прямых измерений ТСО<sub>2</sub> в придонном слое вод и в толще донных отложений (0–5 см). Поток ТСО<sub>2</sub> рассчитывался с учетом молекулярной диффузии растворенных соединений и градиента концентраций согласно первому закону Фика [5]:

$$J = -\varphi D_s \frac{dc}{dz},$$

где J – поток, моль/(год·м<sup>2</sup>); φ – пористость; dC/dZ – градиент концентрации, моль/(м<sup>3</sup>·м); D<sub>s</sub> – коэффициент молекулярной диффузии с учетом вязкости, м<sup>2</sup>/год.

$$D_s = \frac{D_0}{\theta^2},$$

где D<sub>0</sub> – коэффициент молекулярной диффузии воды, м<sup>2</sup>/год; θ – вязкость.

Коэффициенты диффузии ТСО<sub>2</sub> для водной толщи взяты из работы [6] с учетом температурной поправки. Коэффициент молекулярной диффузии поровых вод донных отложений с учетом вязкости рассчитан по уравнению:

$$\theta^2 = 1 - \ln(\varphi^2),$$

Среднее значение потока ТСО<sub>2</sub> составило –0.16 моль/(м<sup>2</sup>·год), таким образом поток ТСО<sub>2</sub> направлен из донных отложений в придонный слой вод, и донные отложения Севастопольской бухты служат источником растворенного неорганического углерода для водной толщи. С учетом полученной величины потока и площади бухты (7.50·10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>) рассчитано, что на годовом масштабе из донных отложений в придонный слой вод бухты поступает около 14.4 т/год растворенного неорганического углерода. Полученные значения согласуются с ранее проведенными исследованиями в данном районе [7].

Установлено, что слабощелочные восстановленные условия, зафиксированные в Севастопольской бухте, создают предпосылки для увеличения ТСО<sub>2</sub>, тем самым повышая роль донных отложений в поступлении СО<sub>2</sub> в придонный слой вод. Можно отметить, что в будущем, при увеличении поступления биогенных элементов и органического вещества в акватории бухты, будет снижаться устойчивость экосистемы и могут развиваться зоны дефицита кислорода.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2025-0001.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А. и др. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь, 2006. 90 с.
2. Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского, А.М. Черняковой. М.: ИО АН СССР, 1992. 201 с.
3. Хоружий Д.С. Использование приборного комплекса AS-C3 для определения парциального давления углекислого газа и концентрации неорганического углерода в морской воде // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2010. Вып. 23. С. 260–272.
4. Гурова Ю.С. и др. Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 71–90. EDN RIPXZQ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-71-90
5. Hyacinthe C. et al. Early diagenetic processes in the muddy sediments of the Bay of Biscay // Marine Geology. 2001. V. 177. Iss. 1–2. P. 111–128. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00127-X)
6. Zeebe R.E. On the molecular diffusion coefficients of dissolved CO<sub>2</sub>, - HCO<sub>3</sub> and 2- CO<sub>3</sub> and their dependence on isotopic mass // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. Iss. 9. P. 2483–2498. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.010>
7. Орехова Н.А., Коновалов С.К., Медведев Е.В. Особенности регионального баланса неорганического углерода морских экосистем в условиях антропогенной нагрузки // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 3. С. 260.

The study examines the contribution of bottom sediments in Sevastopol Bay to the regional carbon budget. It also analyzes the relationship between TSO<sub>2</sub> fluxes and the characteristics of bottom sediments. Based on the data obtained, it was established that slightly alkaline reducing conditions develop in the surface layer of the bay's bottom sediments. It is shown that the TCO<sub>2</sub> flux is directed from bottom sediments to the bottom layer of water (average value –0.16 mol/m<sup>2</sup>·year), and bottom sediments are a source of 14.4 t/year of dissolved inorganic carbon.

**Демина Л.Л., Галкин С.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: ldemina@ocean.ru)

## **Седиментологическая роль донной фауны в Восточно-Сибирском и Лаптевых морях**

**Demina L.L., Galkin S.V.**

(Shirshov Institute of Oceanology, Moscow)

## **Sedimentological role of modern benthic fauna in the East Siberian and Laptev seas**

Ключевые слова: арктические моря, органический и карбонатный углерод, бентосные организмы, донные осадки, биоаккумуляционный потенциал

На основе данных по содержанию органического и карбонатного углерода в доминирующих бентосных организмах и поверхностных донных осадках сделан вывод о важном вкладе донной фауны в продуцирование и трансформацию углерода в Восточно-Сибирском и Лаптевых морях.

На границе вода–дно функционирует глобальный биофильтр-3, в пределах которого популяции донной фауны осуществляют физическую и биогеохимическую переработку осадков, включая биотурбацию, биоирригацию, аккумуляцию и трансформацию химических элементов [1]. По трофической стратегии бентосные организмы подразделяются на несколько основных групп: фильтраторы-сестонофаги, питающиеся взвесью и остатками планктона из придонных слоев воды; детритофаги-грунтоеды, захватывающие детрит с поверхности осадков и из толщи грунта; хищники-плотоядные [2]. Фильтраторы-сестонофаги осуществляют наиболее выраженную концентрационную функцию с коэффициентом биоконцентрирования относительно придонной воды до  $10^5$  [3], тогда как детритофаги-грунтоеды обеднены большинством микроэлементов относительно донных осадков [4, 5]. В арктических морях в условиях невысокой первичной продукции, относительно низких концентраций органического углерода в воде, взвеси и донных осадках [6, 7] бентические сообщества демонстрируют значительное биологическое разнообразие и суммарные биомассы, достигающие на мелководье 330 экз./ м<sup>2</sup> и 180 г/ м<sup>2</sup> соответственно [8–10]. Однако, несмотря на это, роль бентосных организмов в круговороте углерода изучена пока недостаточно. В данной работе сделана сравнительная количественная оценка аккумуляции органического ( $C_{орг}$ ) и карбонатного ( $C_{карб}$ ) углерода в массовых бентосных таксонах и вмещающих поверхностных донных осадках Восточно-Сибирского и Лаптевых морей.

Соотношение органической и карбонатной компонент в тотальных пробах (т.е. целых телах) доминирующих таксонов значительно различается (рис. 1). Целые тела двустворчатых моллюсков *Portlandia arctica*,

преобладающих в прибрежных водах, обеднены органическим углеродом (в среднем 5.98%  $C_{орг}$ ). Напротив, целые тела этих двустворок, содержащие в среднем 11.3%  $C_{карб}$ , почти нацело сложены  $CaCO_3$  (92%, согласно стехиометрическому соотношению  $CaCO_3/C_{карб}=8.33$ ). Меньшую долю карбоната кальция (80 и 65% соответственно) содержат целые тела иглокожих: офиур и морских звезд (рис. 1). Это позволяет разделить организмы на две группы. Первая группа обладает существенной кальцифицирующей функцией (доля  $CaCO_3$  в массе целого тела превышает 60%) и включает двустворчатые моллюски *P. arctica*, офиуры (92% и 80%  $CaCO_3$  соответственно) и морские звезды (65%  $CaCO_3$ ). Ко второй группе относятся ракообразные: изоподы *Saduria sibirica*, в целых телах которых преобладает органическое вещество (ОВ), исходя из соотношения  $ОВ=33.7\%C_{орг}\times 1.85$ . Подобное разделение позволяет оценить потенциальный вклад той или иной группы бентосных организмов в формирование химического состава поверхностных донных осадков.

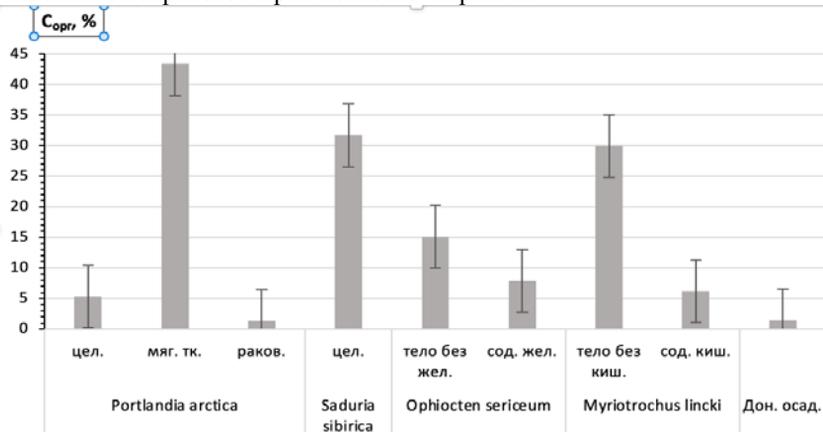
Таксон	$C_{орг}$ , мас. %	$C_{карб}$ , мас. %
 <i>Bivalvia Portlandia arctica</i> – доминирующий на внутреннем шельфе	5,98	11,3 ( 92 % $CaCO_3$ )
 <i>Isopoda Saduria sibirica</i>	33,7	3,67 ( 31 % $CaCO_3$ )
 <i>Ophiuroidea Ophiacten sericeum</i>	12,24	9,59 ( 80 % $CaCO_3$ )
 <i>Asteroidea Ctenodiscus crispatus</i>	13,70	7,76 ( 65 % $CaCO_3$ )

5 cm

Рис. 1. Среднее содержание  $C_{орг}$  и  $C_{карб}$  в целых телах бентосных организмов.

Мягкие ткани двустворчатых моллюсков *P. arctica* наиболее обогащены  $C_{орг}$  (44.4% в среднем) [4, 5]. Ракообразные *Saduria sibirica* и иглокожие голотурии *Myriotrochus rinkii* содержат меньше  $C_{орг}$  – в среднем 31.7% и 29.92% соответственно. По завершении жизненного цикла все организмы становятся субстратом для развития микробной активности, что в конечном итоге способствует диагенетическим преобразованиям осадков. Карбонатные раковины двустворок содержат не более 2%  $C_{орг}$ , что сходно с вмещающими донными осадками (1.43%  $C_{орг}$ ). Сопоставление средних концентраций  $C_{орг}$  в целых телах и различных компонентах тел доминирующих бентосных организмов и вмещающих осадках Лаптевых и

Восточно-Сибирского морей показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Сопоставление средних концентраций  $C_{орг}$  в целых телах и органах исследованных бентосных организмов с донными осадками Лаптевых и Восточно-Сибирского морей. Цел. – тело целиком, мяг. тк. – мягкие ткани; раков. – раковины портландии; тело без жел. – тело без желудка; сод. жел. – содержимое желудка; тело без киш. – тело без кишечника; сод. киш. – содержимое кишечника; дон. осад. – донные осадки.

Как видно из рис. 2, концентрации  $C_{орг}$  в различных органах и тканях донных организмов (кроме карбонатных раковин двустворчатых моллюсков) значительно (от 3 до 30 раз) выше, чем в осадках, что позволяет считать бентосные организмы важным биогенным источником  $C_{орг}$  для осадков. Следует отметить, что в содержимом желудков детритофагов офиур и кишечника грунтоедов голотурий *Myriotrochus rinkii* мы обнаружили среднее содержание  $C_{орг}$  в 4–6 раз выше, чем во вмещающих донных осадках (рис. 2). Это показывает, что в процессе метаболизма детритофаги и грунтоеды осуществляют биохимическую переработку поглощенного ими осадочного детрита, обогащая содержимое желудочно-кишечного тракта органическим углеродом. Для глубоководного детрифага кишечногодышащего *Quatuoralisia malakhovi* установлено трофическое обогащение тяжёлыми изотопами углерода и азота [11], что возможно способствует повышению доли более лабильных форм  $C_{орг}$  в осадке.

Биоаккумуляционный потенциал (БП) [12] характеризует главное свойство живого вещества – продуцирование биомассы, и позволяет количественно оценить накопление химического элемента, исходя из его содержания в целых организмах и их сухой биомассы на единице площади биотопа по формуле:  $БП = C_{элем. организм.} (мкг/г \text{ сух. в.}) \times \text{Биомасса} (г / м^2)$ . В прибрежных водах Восточно-Сибирского и Лаптевых морей двустворчатый моллюск *Portlandia arctica* является доминирующим таксоном [9, 10]. Мы

рассчитали БП этого таксона со средней сухой биомассой 58.4 г/ м<sup>2</sup> на прибрежных станциях. Исходя из среднего содержания 5.98% C<sub>орг</sub> в целом теле *P. arctica*, получим БП= 5.98% C<sub>орг</sub> × 58.4 г/ м<sup>2</sup> = 3.5 г C<sub>орг</sub>/м<sup>2</sup>. Эти данные сопоставимы с таковыми для копеподового зоопланктона северо-восточной части Карского моря – 3.47 г C<sub>орг</sub>/м<sup>2</sup> (данные авторов).

Преимущественно карбонатный состав двустворок портландия и офиур (рис. 1) свидетельствует о важном вкладе этих организмов в круговорот кальция и карбонатного углерода в донной экосистеме. Количественную оценку продуцирования карбоната кальция двустворчатými моллюсками оценим на основе их биомассы и доли CaCO<sub>3</sub> в составе целого тела. Принимая во внимание, что биомасса портландии *P. arctica* на шельфе Восточно-Сибирского моря составляет в среднем 58.4 г, а ее целое тело на 92% в среднем состоит из CaCO<sub>3</sub>, получим: 58.4 г/ м<sup>2</sup> × 0.92 = 53.4 г/ м<sup>2</sup>. Это значение находится в пределах величин среднегодовой массы биогенного карбонатного углерода, поставляемой двустворчатым моллюском *Chamelea gallina* на северо-восточном шельфе Черного моря: 24–627 г/ м<sup>2</sup>·год [13].

Таким образом, в прибрежной зоне Восточно-Сибирского и Лаптевых морей доминирующие бентические сообщества служат важным биогенным источником углерода в донных осадках. Седиментологическая функция бентоса состоит в продуцировании органического углерода и карбонатных биоминералов. Наряду с этим, организмы-детритофаги и грунтоеды в ходе метаболизма биохимически трансформируют поглощенные ими осадки, обогащая органическим углеродом продукты метаболизма и возвращая их в донные отложения, способствуя процессам раннего диагенеза.

Анализ и интерпретация данных выполнены в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ (тема № FMWE-2024-0020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
2. Зенкевич Л.А. Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 739 С.
3. Demina L.L., Galkin S.V., Krylova E.M. et al. Trace metal biogeochemistry in methane seeps on the Koryak slope of the Bering Sea // Deep-Sea Res. II. 2022. V. 206. Art. 105219. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2022.105219>.
4. Demina L.L., Galkin S.V., Solomatina A.S. Bioaccumulation of chemical elements and organic carbon in macrozoobenthic organisms of the Laptev Sea // Oceanology. 2024. V. 64. P. 9–26. DOI: 10.1134/S000143702401004.
5. Demina L.L., Galkin S.V., Solomatina A.S. Trace elements and organic carbon in benthic organisms and bottom sediments of the East Siberian Sea // Geochemistry International. 2024. V. 62. № 10. P. 1077–1095.
6. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в Арктических морях

России. М.: Наука, 2001. 302 с.

7. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // *Геохимия*. 2008. № 2. С. 183–195.

8. Денисенко С.Г., Сиренко Б.И., Гагаев С.Ю., Петряшов В.В. Донные сообщества: структура и пространственное распределение в Восточно-Сибирском море на глубинах свыше 10 м // *Исследование морской фауны*. Санкт-Петербург: Изд-во С-ПГУ, 2010. С. 130–143.

9. Vedenin A.A., Kokarev V.N., Chikina M.V. et al. Fauna associated with shallow-water methane seeps in the Laptev Sea // *Peer J*. 2020. V. 8. e9018. <http://doi.org/10.7717/peerj.9018>

10. Kokarev V.N., Vedenin A.A., Polukhin A.A., Basin A.B. Taxonomic and functional patterns of macrobenthic communities on a high Arctic shelf: A case study from the East Siberian Sea // *J. Sea Res.* 2021. V. 174. 102078. [doi.org/10.1016/j.seares.102078](https://doi.org/10.1016/j.seares.102078).

11. Ежова О.В., Трухан М.А., Лукиных А.И. и др. Особенности питания глубоководного кишечнорастного (*Enteropneusta*, *Torquaratoridae*) из Берингова моря // *Докл. РАН. Науки о жизни*. 2021. Т. 500. № 1. С. 432–436.

12. Демина Л.Л., Галкин С.В. Биоаккумуляция микроэлементов в организмах донных биогеоценозов окислительных и восстановительных обстановок океана: сходство и различие // *Геохимия*. 2018. № 6. С. 572–585. DOI: 10.7868/S0016752518060067.

13. Колючкина Г.А., Беляев Н.А., Любимов И.В. и др. Поставка моллюсками карбонатного углерода в донные осадки северо-восточного шельфа Черного моря // *Материалы XXV Международной Конференции (Школы) по морской геологии*. М.: ИОРАН, 2023. Т. II. С. 154–158. DOI: 10.29006/978-5-6051054-1-1-2023.

Based on the content of organic and carbonate carbon in the dominant benthic organisms and surface bottom sediments, as well as on the taxa's biomass, a conclusion is made about the important contribution of benthic fauna to the production and transformation of carbon in the East Siberian and Laptev Seas.

**Демина Л.Л., Галкин С.В., Коченкова А.И.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: ldemina@ocean.ru)

**О микроэлементном составе инвазивного краба-стригуна  
*Chionoecetes opilio* в Карском море**

**Demina L.L., Galkin S.V., Kochenkova A.I.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**On the trace element composition of the invasive snow crab  
*Chionoecetes opilio* in the Kara Sea**

Ключевые слова: снежный краб-вселенец *Chionoecetes opilio*, Карское море, микроэлементы.

Первые данные о концентрациях девятнадцати микроэлементов в тканях краба-вселенца *Chionoecetes opilio* в Карском море выявили различия в уровнях концентраций разных групп микроэлементов в мышцах, хитиновом покрове ног и икре. Установлено повышенное содержание As в мышцах по сравнению с нормативным значением СанПиН.

Краб-стригун (снежный краб) Decapoda Brachiura *Chionoecetes opilio* (O. Fabricius, 1788) – холодноводный вид, впервые зарегистрированный в Баренцевом море в 1996 г. [1], и с тех пор закрепившийся как инвазивный вид, который активно воспроизводится и распространяется в арктических морях. В Карском море краб-стригун обнаружен позже [2], его распространение обусловлено переносом личинок из Баренцева моря через пролив Карские ворота и желоб Святой Анны [3]. В Карском море обнаруживаются преимущественно взрослые особи опилио и лишь изредка – молодь. В восточных районах молодь практически отсутствует, а наиболее плотные поселения регистрировались в центральной части и заливе Благополучия, достижение промыслового размера может занять 8–9 лет [4]. Краб-стригун опилио предпочитает шельфовые зоны с песчано-илистым дном, обитает на глубинах от 10 до 250 м и выше, оптимальная температура среды: около 0°C. Ширина панциря краба-стригуна в Карском море достигает 114 мм [4, 5]. Инвазия краба-стригуна и рост его популяции приводит к значительному изменению донных экосистем, что выражается в сокращении численности, биомассы и биоразнообразия коренных видов бентических сообществ [6]. Снежный краб – агрессивный хищник и бентофаг, он питается моллюсками, полихетами, ракообразными, в том числе молодью других видов, наряду с детритом. Краб опилио является морепродуктом и широко распространен в Японском, Восточно-Китайском, Беринговом, Баренцевом морях, в районах атлантического побережья Канады и западного побережья Гренландии. В России краб-стригун признан чужеродным инвазивным видом, но разрешен к промыслу как источник ценного белка в рационе человека. Необходимые аминокислоты, полезные

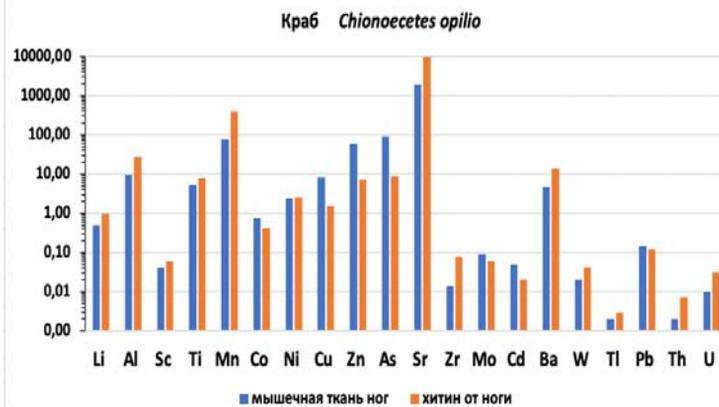
липиды, кальций, фосфор и магний содержатся в значительных концентрациях не только в мышечных тканях краба-стригуна, используемых в качестве продуктов питания, но и в хитиновом панцире, который служит сырьем для пищевой и фармацевтической индустрии [7]. Установленные пороговые концентрации токсичных соединений в мышечных тканях ног снежного краба в суточном потреблении человека способствуют минимизации риска интоксикации [8, 9]. Важнейшая тема безопасности морепродуктов в российских промысловых районах освещена лишь в нескольких публикациях [10, 11]. В мышцах краба-стригуна, обитающего на северо-восточном шельфе о. Сахалин [11], содержание Pb, Cd и As было ниже предельно допустимых уровней токсичных элементов, составляющих для Pb 10, Cd 2 и As 5 мкг/г сыр. массы [12]. В мышечной ткани данного вида крабов из российских вод Японского моря содержание As превышает нормативные концентрации [10]. В мышцах краба опилио, выловленного в Японском море у побережья Кореи, были определены безопасные концентрации Pb и Cd (0.02 и 0.09 мкг/г сыр. массы соответственно), а содержание As варьировало от 2.7 до 78.2 мкг/г сыр. массы (в среднем 18.7 мкг/г сыр. массы), что превышает предельно допустимый уровень [9].

В связи с вышесказанным, исследование биоаккумуляции микроэлементов, в том числе потенциально токсичных, в гидробионтах арктических бассейнов остается актуальным. Задача данной работы – оценка уровней концентрации группы микроэлементов в разных тканях краба-стригуна (мышцы ног, хитиновый покров и икра), обитающего в Карском море. Донные организмы были собраны тралом Сигсби в экспедициях 72-го и 93-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2018 и 2023 гг. соответственно). Концентрации элементов (Al, Sc, Ti, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Ba, W, Ti, Pb, Th и U) после полного кислотного разложения проб тканей краба определяли методом ИСП-МС на анализаторе Agilent 7500a (США). Правильность анализа контролировали одновременным анализом международного стандартного образца NIST 2976 mussel tissues. Рассмотрены лишь те элементы, средние измеренные концентрации которых отклонялись от аттестованных значений NIST 2976 в пределах 15%.

Наши данные по содержанию Pb и Cd в мышечных тканях (в среднем 0.12 и 0.02 мкг/г сух. в. соответственно) не превышали нормативных значений СанПиН (Pb 10 и Cd 2 мкг/г сыр. в.) при пересчете с сухой массы на сырую (с коэффициентом 0.5). В то же время As показал очень высокую среднюю концентрацию (90 мкг/г сух. в.), превышающую почти в 10 раз предельно допустимый уровень в ракообразных, соответствующая аналогичным данным для краба опилио из корейского побережья Японского моря [9]. Значительно более высокое содержание As (в 10–20 раз) по сравнению с Pb и Cd нами выявлено в зоопланктоне Карского моря [13], детрит которого

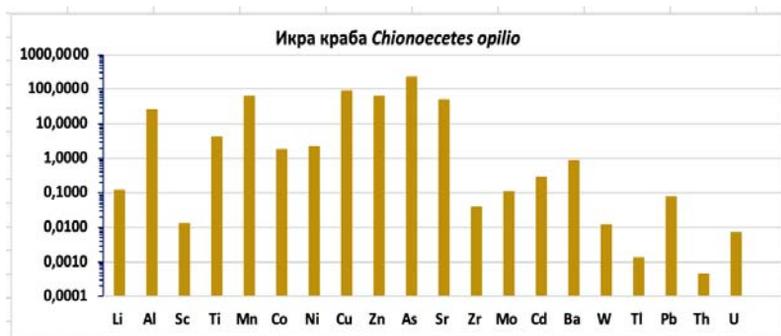
служит частью рациона ракообразных. С другой стороны, в поверхностных донных осадках Карского моря обнаружены высокие содержания As, достигающие 80 мкг/г сух. в. [14], что говорит о влиянии среды обитания на накопление As в крабе опилио, который по типу питания относится к хищникам и мусорщикам. Известно, что ракообразные поглощают химические элементы из вмещающих осадков и пищи, а также непосредственно из воды через жабры, при этом биодоступность элементов определяется параметрами среды обитания. Не следует исключать и фактор биомагнификации (возрастание концентрации элемента) с повышением трофического уровня организма, в данном случае – плотоядного краба опилио.

Сопоставление средних концентраций (мкг/г сух. в.) девятнадцати микроэлементов в двух разных тканях краба опилио – мышцах и хитиновом покрове (рис. 2) показывает их существенные различия. В хитиновом покрове повышены относительно мышечной ткани концентрации большинства элементов, для части которых биологическая функция до конца не установлена (Li, Al, Sc, Ti, Zr, Ba и W), для биоактивных (Mn, Sr), а также для потенциально токсичных Tl, Th и U. В мышечной ткани относительно хитина повышены содержания таких эссенциальных тяжелых металлов как Co, Ni, Mo и Cd, особенно сильно (до 10 раз) – Cu и Zn, а также потенциально токсичного As.



**Рис. 2.** Концентрации микроэлементов (мкг/г сух.в.) в мышечной ткани и хитине ног краба-стригуна *Chionoecetes opilio*.

В икре краба опилио по сравнению с мышцами и хитиновым покровом значительно повышены концентрации лишь эссенциальной Cu и потенциально токсичного As, тогда как большинство остальных микроэлементов находятся на сходном уровне концентрации, а Sr, Ba, W и Th показывают почти десятикратное понижение (рис. 3).



**Рис. 3.** Концентрации микроэлементов (мкг/г сух. в.) в икре краба-стригуна *Chionoecetes opilio*.

Таким образом, выявлено неселективное накопление микроэлементов; при этом повышенные содержания эссенциальных Cu, Zn, Co, Ni и Mo, а также потенциально токсичных As и Cd, отмечены в мышечных тканях по сравнению с хитиновым экзоскелетом. Металлоид As существенно превышает нормируемый показатель СанПиН для морепродуктов, одной из причин чего может служить высокое содержание As в поверхностных осадках Карского моря. В хитиновом покрове в большей степени по сравнению с мышцами концентрируются литогенные элементы Li, Al, Sc, Ti, Zr, Ba и W, наряду с биоактивными Mn и Sr, а также наиболее токсичными Tl, Th и U; последние по сравнению с другими элементами показали минимальные концентрации (менее 0.1 мкг/г сух. в.) в мышечной ткани, используемой как продукт питания.

Экспедиционные исследования, анализ и интерпретация полученных данных выполнялись в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ (тема № FMWE-2024-0020).

Обработка и анализ проб выполнена в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ (тема № FMWE-2024-0020).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С.А., Ахтарин С.М., Менис Д.Т. Первые находения краба-стригуна *Chionoecetes opilio* (Decapoda, Majidae) в Баренцевом море // Зоол. журн. 1998. Т. 77. № 4. С. 489–491.
2. Зими́на О.Л. Находка краба-стригуна в Карском море // Биология моря. 2014. Т. 40. № 6. С. 497–499.
3. Zalota A.K., Spiridonov V.A., Vedenin A.A. Development of snow crab *Chionoecetes opilio* (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) invasion in the Kara Sea // Polar Biology. 2018. <http://doi.org/10.1007/s00300-018-2337y>.
4. Pavlov A.V., Sundet J.H. Snow crab // The Barents Sea ecosystem, resources,

management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. P. 168–172.

5. Залота А.К., Спиридонов В.А., Галкин С.В. и др. Популяционная структура краба-вселенца (*Chionoecetes opilio*) в Карском море (траловые сборы и видеоучет) // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 97–103.

6. Udalov A.A., Anisimov I.M., Basin A.B. et al. Changes in benthic communities in Blagopoluchiya Bay (Novaya Zemlya, Kara Sea): the influence of the snow crab // Biol. Invasions. 2024. V. 26. P. 3455–3473.

7. Lage-Yusty M. A., Vilasoa-Martinez M., Alvarez-Perez S. et al. Chemical composition of snow crab shells (*Chionoecetes opilio*) // CyTA-Journal of Food. 2011. V. 9. № 4. P. 265–270.

8. Julshman K., Valdernes S., Duinker A. et al. Heavy metals and POPs in red king crab from the Barents Sea // Food Chem. 2014. V. 15 (167). doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.003.

9. Hwang D.-W., Choi M., Lee I.-S. et al. Concentrations of trace metals in tissues of *Chionoecetes* crabs (*Chionoecetes japonicus* and *Chionoecetes opilio*) caught from the East Japan Sea waters and potential risk assessment // Environ. Sci. and Pollut. Res. 2017. V. 24 (12). P. 11309–11318. doi: 10.1007/s11356-017-8769-z.

10. Наревич И.С., Ковековдова Л.Т. Микроэлементы (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) в промысловых ракообразных Японского моря // Известия ТИНРО. 2017. Т. 189. С. 147–155.

11. Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е. и др. Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина // Геосистемы переходных зон. 2023. Т. 7. № 1. С. 95–102.

12. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Госкомсанэпиднадзор, 2002. 156 с.

13. Демина Л.Л., Беляев Н.А., Будько Д.Ф. и др. Аккумуляция микроэлементов разными размерными группами зоопланктона в Карском море // Океанология. 2025. Т. 65. № 5. С. 89–109.

14. Budko D.F., Demina L.L., Travkina A.V. et al. The Features of Distribution of Chemical Elements, including Heavy Metals and Cs-137, in Surface Sediments of the Barents, Kara, Laptev and East Siberian Seas // Minerals. 2022. V. 12. 328.

The first data on the concentrations of nineteen trace elements in the tissues of the invader crab *Chionoecetes opilio* in the Kara Sea revealed differences in the levels of concentrations of different groups of trace elements in muscles, chitinous legs and eggs. The elevated As content in muscles was found compared to the standard value of SanPiN.

**Дубинин А.В.<sup>1</sup>, Римская-Корсакова М.Н.<sup>1</sup>, Дубинина Е.О.<sup>2</sup>,  
Демидова Т.П.<sup>1</sup>, Семилова Л.С.<sup>1</sup>, Бережная Е.Д.<sup>1</sup>,  
Зологина Е.Н.<sup>1</sup>, Очередник О.А.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:  
[dubinina@ocean.ru](mailto:dubinina@ocean.ru); <sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений петрографии,  
минералогии и геохимии РАН, г. Москва)

**Аноксигенное окисление сероводорода в Черном море**  
**Dubinina A.V.<sup>1</sup>, Rimskaia-Korsakova M.N.<sup>1</sup>, Dubinina E.O.<sup>2</sup>,  
Demidova T.P.<sup>1</sup>, Semilova L.S.<sup>1</sup>, Berezhnaya E.D.<sup>1</sup>,  
Zologina E.N.<sup>1</sup>, Ocherednik O.A.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; <sup>2</sup>Institute of Geology of Ore Deposits,  
Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Moscow)

**Anoxygenic oxidation of hydrogen sulfide in the Black Sea**

Ключевые слова: элементная сера, фотоавтотрофные бактерии, аноксигенное окисление сероводорода, Черное море

Элементная сера в фотической зоне меромиктических водоемов – продукт аноксигенного окисления сероводорода фотосинтетическими бактериями. Фотоавтотрофные бактерии слабо распространены в Черном море и находятся в неактивном состоянии, так как фотическая зона (глубина 50–60 м) находится гораздо выше верхней границы сероводородной зоны, глубина которой в центре моря 90–100 м, опускаясь в периферийных районах до 150–170 м. Однако исследование распределения элементной серы в анаэробной зоне Черного моря показало, что воды с глубин 180–300 м обладают световой чувствительностью. Облучение светом при отборе проб воды приводит к резкому росту концентраций серы до 11.3 мкмоль/кг при фоновых значениях 0.15–0.18 мкмоль/кг в строго анаэробных условиях.

Элементная сера – обычный продукт окисления сероводорода в зоне хемоклина меромиктических водоемов, где в качестве окислителя сульфида могут выступать растворенный кислород, нитрат, Mn(IV) и Fe(III) [1]. На границе окисленных и восстановленных вод в Черном море повышенные концентрации серы обычно не обнаруживаются [2]. Определимые концентрации элементной серы (больше 0.01 мкмоль/кг для используемой методики [3]) появляются вместе с сероводородом и слабо растут с глубиной в зависимости от концентраций сероводорода. Изотопный состав элементной серы Черного моря на глубинах 450 и 600 м у кавказского и крымского побережий показал, что величина  $\delta^{34}\text{S}$  у элементной серы в среднем больше на 2.2‰, чем у сероводорода с этой же глубины. Более тяжелый изотопный состав серы относительно сероводорода свидетельствует о бактериальном происхождении элементной серы [4].

В фотической зоне меромиктических водоемов появление элементной серы обычно является результатом аноксигенного окисления сульфида

фотоавтотрофными бактериями в анаэробных условиях. Эта сера в условиях дефицита сульфида может использоваться в дальнейшем, окисляясь до сульфата, при наращивании биомассы бактерий за счет потребления растворенной углекислоты [4].

Производство элементарной серы фотосинтетическими бактериями в анаэробной зоне Черного моря возможно лишь в центральной его части, где граница редокс интерфейса ближе всего располагаются у поверхности моря. С глубиной интенсивность солнечного света уменьшается по экспоненциальному закону [5]. Заглубление границы интерфейса у побережья до 170 м практически исключает фотосинтез у анаэробных бактерий. Однако, ниже редокс интерфейса в зоне повышенных содержаний взвешенного органического углерода и максимума количества бактериальных клеток в воде с плотностью 16.43–16.75 кг/м<sup>3</sup> (глубина 230–300 м) резко возрастает количество элементарной серы с размером частиц больше 0.45 мкм, достигая 11 мкмоль/кг.

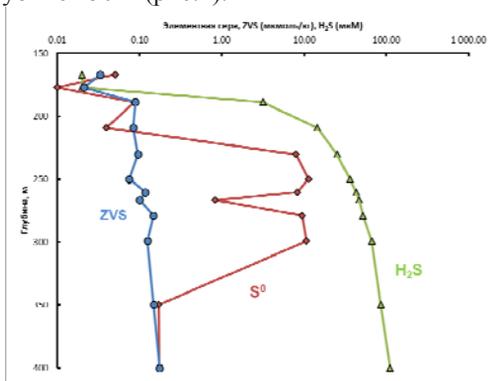
Целью данной работы является выяснение происхождения максимума элементарной серы в верхней части анаэробной зоны на глубинах 230–300 м на континентальном склоне кавказского побережья Черного моря. Для достижения этой цели в области глубин максимальных концентраций элементарной серы были проведены эксперименты по предварительному удалению сероводорода из проб и подавлению бактериальной активности раствором глютаральдегида в финальной концентрации 2.5%. В отобранных пробах взвешенной элементарной серы (размер частиц > 0.45 мкм) было проведено определение величин  $\delta^{34}\text{S}$ . При помощи метода SEM-EDX рассмотрены формы выделения элементарной серы на фильтрах.

Станции проведения исследований Ашамба29 (дата отбора 05.07.23) с координатами (44.489° с.ш., 37.869° в.д.) и Ашамба31 (10.10.23) с координатами (44.517° с.ш., 37.907° в.д.) находятся в 7 и 5 милях от Голубой бухты на континентальном склоне, глубина водной толщи составляет 1200 и 500 м соответственно. Гидрофизические измерения выполнялись зондом «Sea Bird 19+» фирмы Sea-Bird Electronics, Inc. Отбор проб проводился с помощью комплекса “Rosette”, оснащенного шестью 4-литровыми батометрами Нискина. Для заполнения батометров использовался аргон.

Фильтрация морской воды проводилась через фильтры с размером пор 0.45 мкм Millipore в атмосфере аргона, масса проб составила примерно 1 кг. В фильтрах определяли элементарную серу спектрофотометрическим методом после дистилляции в виде сероводорода, полученного восстановлением элементарной серы двухвалентным хромом [3]. Для определения концентрации элементарной серы ее осаждали в виде ZnS, для изотопного анализа сероводород осаждали в виде Ag<sub>2</sub>S. Изотопный состав элементарной серы на станции Ашамба29 (глубина 250 и 260 м) был определен методом CF-IRMS на масс-спектрометре DELTA V+ (Finnigan, Германия). Фильтр пробы с глубины 250 м (ст. Ашамба29) был использован

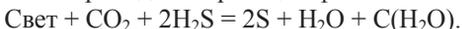
для визуальной оценки форм выделений серы и локального их анализа с помощью метода SEM-EDX на приборе JEOL-IT500LA (ИГЕМ РАН).

Концентрация взвешенной элементной серы в верхней части анаэробной зоны до глубины 209 м (станция Ашамба29, плотность 16.43 кг/м<sup>3</sup>) менялась в пределах от 0.01 до 0.09 мкмоль/кг. Ниже этого горизонта в интервале глубин 230-299 м наблюдался рост концентраций S<sup>0</sup> максимально до 11.3 мкмоль/кг на глубине 250 м (рис.1).



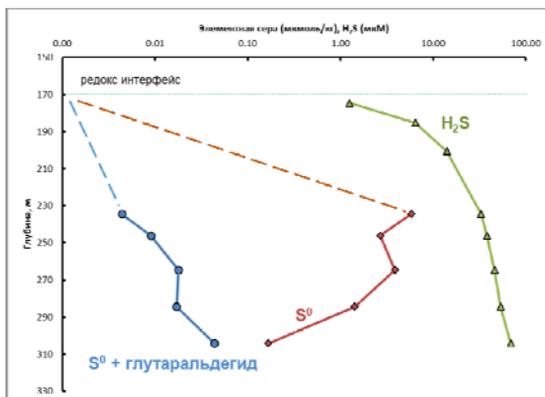
**Рис. 1.** Распределение ZVS (zero-valent sulfur, определяется в пробе после полного удаления сероводорода немедленно после пробоотбора), взвешенной элементной серы и сероводорода в воде станции Ашамба29 (июль 2023 г.).

Появление заметных количеств элементной серы в пробах, отобранных в строго анаэробных условиях, может быть связано с бактериальными процессами аноксигенного окисления сероводорода, который инициируется светом и проходит по реакции фотосинтеза:

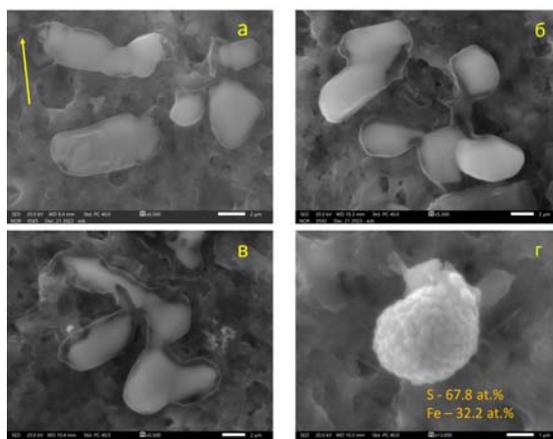


Чтобы подтвердить это, осенью 2023 г. на станции Ашамба31 мы добавили раствор глутаральдегида в концентрации 2.5% в серии проб на 5 горизонтах в интервале плотности 16.55–16.75 кг/м<sup>3</sup>. Раствор глутаральдегида 2.5% ингибирует бактериальную активность. В результате мы получили подавление бактериальной деятельности и отсутствие накопления элементной серы в серии с глутаральдегидом (рис.2.).

Величины  $\delta^{34}\text{S}$  составили в среднем для двух отдельных проб  $-36.8 \pm 0.2\text{‰}$  для горизонта 260 м и  $-36.2 \pm 0.2\text{‰}$  для горизонта 250 м. С учетом полученных данных по изотопному составу серы сульфида ( $-40.8\text{‰}$ ) фракционирование изотопов серы между сульфидом и элементной серой составило  $+4.0 - +4.6\text{‰}$ . Это близко к изотопным эффектам, полученным в экспериментах для фототрофных бактерий, и близко к наблюдаемым для меромиктических озер.



**Рис. 2.** Распределение элементарной серы (штриховой линией – предполагаемое) в пробах с добавлением глутаральдегида (2.5%) и без его добавления по вертикали толщи анаэробных вод на станции Ашамба31 в октябре 2023 г. Для характеристики анаэробных вод приведены концентрации сероводорода.



**Рис. 3.** Морфология выделений элементарной серы внутри клеток бактерий (а-в) и пирита (г) на горизонте 250 м станции Ашамба29. Стрелкой на рис. 3а показано место соединения двух клеток бактерий.

Сера при изучении методом SEM-EDX на горизонте 250 м станции Ашамба29 встречена в виде двух форм – элементарной серы в клетках бактерий и в виде фрамбоидального пирита (рис. 3). На рис. 3 хорошо видно, что элементарная сера заполняет внутреннее клеточное пространство и, по-видимому, является результатом бактериального окисления сульфида. Наличие бактерий, живущих в условиях отсутствия света, но способных к

фотосинтезу при его появлении, является серьезным препятствием для возможного подъема сероводорода в фотическую зону при изменении плотностной структуры моря в ходе потепления климата.

Работа выполнена за счет средств госзадания ИО РАН № FMWE-2024-0018 по программе «Черное море – 2023».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henkel J.V., Dellwig O., Pollehne F. et al. A bacterial isolate from the Black Sea oxidizes sulfide with manganese (IV) oxide // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2019. V. 116. № 25. P. 12153–12155.
2. Dubinin A.V., Demidova T.P., Ocherednik O.A. et al. Distribution and Variations of Elemental Sulfur in the Upper Part of the Black Sea Anoxic Water Column // *Oceanology*. 2024. V. 64. № 2. P. 250–259. DOI: 10.1134/S0001437024020048
3. Дубинин А.В., Демидова Т.П., Римская-Корсакова М.Н. и др. Определение восстановленных форм серы в воде анаэробных бассейнов // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35. № 1. С. 37–51. DOI:10.22449/0233-7584-2019-1-37-51
4. Zerkle A.L., Farquar J., Johnston D.T. et al. Fractionation of multiple sulfur isotopes during phototrophic oxidation of sulfide and elemental sulfur by a green sulfur bacterium // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2009. V. 73. P. 291–306.
5. Marschall E., Jogler M., Henßge U., Overmann J. Large-scale distribution and activity patterns of an extremely low-light-adapted population of green sulfur bacteria in the Black Sea // *Environmental microbiology*. 2010. V. 12. № 5. P. 1348–1362.

Elemental sulfur in the photic zone of meromictic basins is a product of anoxygenic oxidation of hydrogen sulfide by photosynthetic bacteria. Photoautotrophic bacteria are poorly distributed in the Black Sea and are in an inactive state, since the photic zone (depth 50–60 m) is much higher than the upper boundary of the hydrogen sulfide zone, the depth of which is 90–100 m in the center of the sea, deepening to 150–170 m in the peripheral areas. However, a study of the distribution of elemental sulfur in the anaerobic zone of the Black Sea has shown that waters from depths of 180–300 m have light sensitivity. Irradiation with light during water sampling leads to a sharp increase in sulfur concentrations to 11.3 mmol/kg with background values of 0.15–0.18 mmol/kg under strictly anaerobic conditions.

**Дударев О.В.<sup>1,2</sup>, Чаркин А.Н.<sup>1</sup>, Черных Д.В.<sup>1,2</sup>, Рубан А.С.<sup>3</sup>,  
Пипко И.И.<sup>1</sup>, Пугач С.П.<sup>1</sup>, Мотора А.П.<sup>1</sup>, Астахов А.С.<sup>1</sup>,  
Семилетов И.П.<sup>1,2</sup>, Gustafsson Ö.<sup>4</sup>**

(<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток; e-mail: [dudarev@poi.dvo.ru](mailto:dudarev@poi.dvo.ru); <sup>2</sup>Томский государственный университет; <sup>3</sup>Томский политехнический университет; <sup>4</sup>Department of Environmental Science and the Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Sweden)

## **Литологические и биогеохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря**

**Dudarev O.V.<sup>1,2</sup>, Charkin A.N.<sup>1</sup>, Chernykh D.V.<sup>1,2</sup>,  
Ruban A.S.<sup>3</sup>, Pipko I.I.<sup>1</sup>, Pugach S.P.<sup>1</sup>, Motora A.P.<sup>1</sup>,  
Astakhov A.S.<sup>1</sup>, Semiletov I.P.<sup>1,2</sup>, Gustafsson O.<sup>4</sup>**

(<sup>1</sup>V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok; <sup>2</sup>Tomsk State University, Russia; <sup>3</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia; <sup>4</sup>Department of Environmental Science and the Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Sweden)

## **Lithological and biogeochemical characteristics of the East Siberian Sea bottom sediments**

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, донные осадки, органический углерод, изотопно-молекулярные маркеры.

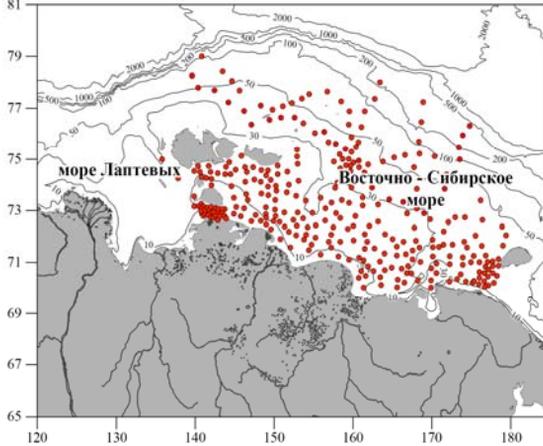
Рассмотрены особенности формирования литологической структуры донных осадков шельфового Восточно-Сибирского моря и прилегающего континентального склона. Представлена новая карта. На основе данных по элементному и изотопно-молекулярному составу органического углерода выполнено биогеохимическое районирование акватории, выявлены тренды поведения перечисленных маркеров в современной климатической обстановке. Обоснованы представления о переносе и биодegradации органического вещества терригенного генезиса.

Шельфовое Восточно-Сибирское море (ВСМ) испытало экстремально неблагоприятные экологические условия во время последнего климатического минимума. Это обстоятельство позволило рассматривать акваторию в качестве мезомасштабного полигона для выявления характерных особенностей современного перегибациального восточно-арктического литогенеза, источника новых фундаментальных знаний, основы для палеогеографической ретроспективы и прогнозной оценки изменений окружающей среды.

Многолетние национальные и международные исследования в регионе (1999–2024 гг.) дали возможность получить обширный массив литологических и биогеохимических данных, соответственно, из 664 и 397 локаций (рис. 1).

Подготовлена новая карта донных осадков, охватывающая ВСМ и прилегающий материковый склон. Прослеживалось абсолютное

преобладание илов (>90% площади дна) – маркера мощных источников тонкозернистого терригенного материала единой питающей провинции. Пространственная дифференциация фракционной структуры демонстрировала согласованность с прерывистостью позднечетвертичной трансгрессии моря, с морфоструктурой дна, ледовым режимом акватории и характером циркуляции вод. К примеру, граница между тонко- и менее дисперсными илами приурочена к ступени палеоуровня –30 м временной стабилизации бореальной трансгрессии (9–8 тыс. л.н.). Корреляция со среднемноголетним положением кромки дрейфующего льда подчеркивала значимость 10-месячной подледной седиментации.



**Рисунок.** Локации станций пробоотбора.

Результирующее среднемноголетнее распределение органического углерода (ОС) в донных осадках (SOC) связано с литологической структурой и распределением ОС придонной взвеси (РОС). Диапазон содержания SOC 0.1–3.8%, с наибольшей изменчивостью на западной (материковые источники ОС) и восточной (морской источник ОС) перифериях ВСМ, а также в области влияния стока рек Индигирки и Колымы. Среднемноголетний результирующий изотопный сигнал SOC демонстрировал мезомасштабный тренд утяжеления от –28.3‰ в западной биогеохимической области (западная часть ВСМ) до –19.5‰ в восточной (восточная часть ВСМ), как и для РОС. Аналогичное поведение отмечено и в характере пространственной изменчивости результирующего среднемноголетнего вклада терригенного ОС. Его максимальный вклад в SOC западной области достигал 100%, тогда как в восточной снижался до 0% [1].

Согласно величинам изотопно-молекулярных маркеров, «старый» терригенный SOC (6500–5000 посл. кал. лет) занимал всю западную область

моря или ~50% площади дна ВСМ. «Молодой» морской арктический планктон (500–300 посл. кал. лет) распространен на северо-востоке, вблизи Чукотского моря (~10% площади дна). Переходный между «старым» и «молодым» терригенно-морской SOC встречен примерно на 40% площади. Вследствие биодegradации содержание терригенного SOC к внешнему шельфу сокращалось почти на 85% [2, 3].

Данные многолетних национальных и международных исследований включены в Первую международную базу стран Арктической зоны (Россия, Швеция, США, Великобритания, Канада, Норвегия и др.) «CASCADE – The Circum-Arctic Sediment Carbon Database [4, 5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 25-17-00075.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dudarev O., Charkin A., Shakhova N. et al. East Siberian Sea: interannual heterogeneity of the suspended particulate matter and its biogeochemical signature // *Progress in Oceanography*. 2022. V. 208. 102903. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2022.102903>.
2. Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al. Preferential burial of permafrost derived organic carbon in Siberian-Arctic shelf waters // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2014. V. 119. doi:10.1002/2014JC010261.
3. Bröder L., Tommaso T., Andersson A. et al. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea // *Organic Geochemistry*. 2016. V. 91. P. 16–30.
4. Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al. CASCADE – The Circum-Arctic Sediment CARbon DatabasE // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. № 6. P. 2561–2572.
5. Martens J., Wild B., Semiletov I. et al. Circum-Arctic release of terrestrial carbon varies between regions and sources // *Nature Communications*. 2022. V. 13. 5858.

The features of the formation of the lithological structure of bottom sediments of the periglacial shelf and the slope of the East Siberian Sea are considered, and a new map is presented. Based on data on the elemental and isotopic-molecular composition of organic carbon, a biogeochemical zoning of the water area was carried out, and trends in the behavior of the listed markers in the current climatic conditions were identified. The concepts of transfer and biodegradation of organic matter of terrigenous genesis are substantiated.

**Заварзина А.Г.<sup>1</sup>, Беляев Н.А.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, г. Москва, e-mail: zavarzina@mail.ru; <sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва)

## **Неучтенные наземные источники биомаркеров лигнина в биосфере**

**Zavarzina A.G.<sup>1</sup>, Belyaev N.A.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow; <sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Unaccounted-for terrestrial sources of lignin biomarkers in the biosphere**

Ключевые слова: растворимые фенольные соединения, лишайники, мхи, биогеохимия органического вещества.

Исследовано содержание биомаркеров лигнина в лишайниках, мхах и образуемых этими растениями торфах. Показано, что лишайники служат значимым источником монофенолов лигнина, в том числе в водорастворимой форме. Это предполагает возможность миграции этих соединений в водотоки. Низшая растительность является ранее неучтенным источником структур лигнина в почвах и гидросфере.

Лигнин является важнейшим источником ароматических структур в почвах и гидросфере [1, 2]. Он входит в состав одревесневших тканей сосудистых растений и занимает второе место после полисахаридов по распространению среди природных биополимеров (23–38% в хвойных и 14–25% в лиственных породах) [1]. Ароматические структуры лигнина являются ключевыми предшественниками гуминовых веществ почв [3, 4] и значимым источником ароматического углерода в океанах [5].

Известным методом определения содержания и состава фенольных структур лигнина в природных объектах (растительности, почвах, донных осадках) является CuO-окисление в щелочной среде с дальнейшим газохроматографическим анализом продуктов окисления [2]. Характерными продуктами деструкции лигнина являются ванилиновые (В), сиреневые (С), пара-оксибензойные (П) структуры (кислоты, альдегиды, кетоны), а также коричневые структуры (К) – феруловая и пара-кумаровая кислоты [6]. Эти соединения считаются биомаркерами лигнина, а также маркерами органического вещества наземного происхождения [5]. Однако, они были обнаружены также в продуктах CuO-окисления ряда видов лишайников и мхов [7]. Лишайники и мхи не содержат лигнин, что стоит учитывать при отнесении продуктов CuO-окисления к биомаркерам этого биополимера. Дальнейшие исследования показали, что содержание фенолов “лигнина” ( $\Sigma$ ПВСК) в леканоровых и пельтигеровых лишайниках варьирует в широких пределах – от 0.06 до 19.9 мг/г (0.01–2.6% от  $C_{\text{орг}}$ ). В ряде видов (*C.islandica*, *A.ochroleuca*, *C.rangiferina*, *C.stellaris*, *P.polidactilon*,

*P.praetextata*), выявлено преобладание ванилиновых и сиреневых структур над *p*-оксibenзойными, что характерно для лиственных растений. Помимо биомаркеров “лигнина” в некоторых лишайниках обнаружены также водорастворимые конъюгаты протокатеховой, галловой и кофейной кислот [8]. Эти соединения обладают высокой реакционной способностью в реакциях свободнорадикальной конденсации, приводящей к образованию гуминовых веществ. Установлено, что в большинстве изученных мхов (сфагновых и в *Pleurozium schreberi*) абсолютно преобладают *p*-оксibenзойные структуры ( $\Sigma$ ПВСК 0.25–5.1,  $\Sigma$ ВСК 0.03–0.17). Состав фенольных структур в лишайниках оказался наиболее разнообразен по сравнению со мхами и высшей растительностью – это касается и фенолов “лигнина” и других исследованных фенольных кислот. Выявлено, что эти соединения накапливаются и в водорастворимой форме, отчасти в виде конъюгатов с аминокислотами и сахарами [8, 9].

Содержание биомаркеров лигнина в лишайниках и мхах оказалось сопоставимым с недревесневшими тканями высшей растительности. Сумма биомаркеров лигнина ( $\Sigma$ ВСК) в леканоровых лишайниках составляла 1.4–18 мг/г и в пельтигеровых – 0.4–10.3 мг/г, что сопоставимо или существенно выше этого показателя в листовом опаде (0.8–2.7 мг/г). В ряде видов лишайников (*C.islandica*, *C.rangiferina*, *P.polidactylon*, *P.praetextata*) содержание биомаркеров лигнина (7.0–18.3 мг/г) оказалось близким к таковому в кустарничке *Empetrum nigrum* (13 мг/г). Лишайники и мхи доминируют в напочвенном покрове тундр и олиготрофных лесов, занимающих значительные площади на севере России. Лишайники являются неучтенным, но значимым источником структур “лигнина”, что расширяет представления о происхождении ароматического углерода в почвах и гидросфере.

Работа выполнена в рамках госзадания 121040800154-8.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пересыпкин В.И., Романкевич Е.А. Биогеохимия лигнина. М.: ГЕОС, 2010. 340 с.
2. Thevenot M., Dignac M.-F., Rumpel C. Fate of lignins in soils: a review // Soil Biology and Biochemistry. V. 42. P. 1200–1211.
3. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
4. Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В. и др. Гуминовые вещества: гипотезы и реальность // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1480.
5. Hedges J.I., Keil R.G., Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? // Organic Geochemistry. 1997. V. 27. № 5/6. P. 195–212.
6. Hedges J.I., Mann D.C. The characterization of plant tissues by their lignin oxidation products // Geochimica and Cosmochimica Acta. 1979. V. 43. P. 1803–

1807.

7. Заварзина А.Г., Романкевич Е.А., Пересыпкин В.И. и др. Фенолы-дериваты лигнина в лишайниках // Докл. Академии Наук. 2015. Т. 465. № 4. С. 494–497.

8. Zavarzina A.G., Nikolaeva T.N., Demin V.V. et al. Water-soluble phenolic metabolites in lichens and their potential role in soil organic matter formation at the pre-vascular stage // *European Journal of Soil Science*. 2019. V. 70. P. 736–750.

9. Загоскина Н.В., Николаева Т.Н., Лапшин П.В. и др. Водорастворимые фенольные соединения у лишайников // *Микробиология*. 2013. Т. 82. № 4. С. 434–441.

We have studied the content of lignin biomarkers in lichens, mosses, and peats formed by these plants. It has been shown that lichens serve as a significant source of lignin monophenols, including those in water-soluble form. This suggests the possibility of migration of these compounds into watercourses. Lower vegetation is a previously unaccounted-for source of lignin structures in soils and the hydrosphere.

**Кокрятская Н.М., Лосюк Г.Н., Попов С.С., Титова К.В.**

(Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, e-mail: [nkokr@yandex.ru](mailto:nkokr@yandex.ru))

**Антропогенная изоляция морских заливов. Озера Большие и Малые Хрусломены, Кандалакшский залив Белого моря**

**Kokryatskaya N.M., Losyuk G.N., Popov S.S., Titova K.V.**

(N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia)

**Anthropogenic isolation of sea bays. Lakes Bolshie and Malye Khruslomeny, Kandalakshsky Bay of the White Sea**

Ключевые слова: Белое море, отделяющиеся водоемы, стратификация, гидрохимические параметры

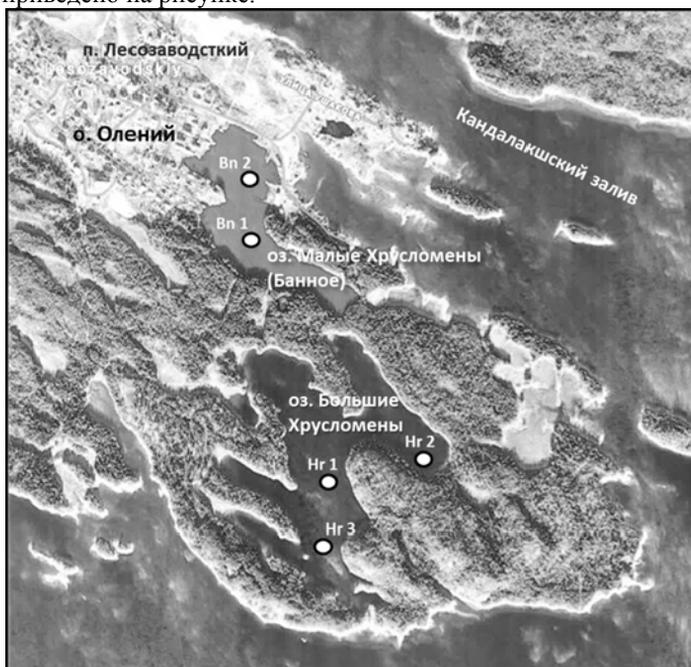
Приведены результаты исследований озер Большие и Малые Хрусломены (ныне оз. Банное), бывших морских заливов, отделенных от моря в начале XX века при строительстве лесозавода на острове Олений (Кандалакшский залив Белого моря). В настоящее время оз. Банное полностью пресное, а оз. Большие Хрусломены, является меромиктическим водоемом с эвксинной аноксией.

Данная работа выполнена на примере двух озер Большие и Малые Хрусломены, расположенных на острове Олений, губа Ковда, пос. Лесозаводский, Кандалакшский залив Белого моря и является продолжением наших исследований по изучению водоемов, в разной степени отделившихся от Белого моря. В отличие от ранее исследованных прибрежных озер [1–3], на отделение этих водоемов от моря не влияли природные процессы (например, постепенное постгляциальное поднятие суши). Они были отделены от моря искусственно при постройке лесозавода на о. Олений в 1895 г., путем увеличения высоты естественных порогов, отделявших их от моря, с целью опреснения для заправки паровых машин лесозавода. До этого времени это были глубоко врезающиеся в сушу морские заливы.

Работы по изучению современного состояния обоих водоемов были проведены в августе 2024 г. Основные гидрохимические характеристики определяли непосредственно на борту лодки при помощи портативного оксиметра HQ30D.99 с люминесцентным датчиком LDO (Hach Lange), кондуктометра HI 8733 (Hanna) и pH-метра HI 991001 с автотермокомпенсацией (Hanna). В условиях полевой лаборатории в день отбора проб определяли концентрации сероводорода (фотометрическим и йодометрическим методами), форм растворенного железа (в отфильтрованных при отборе через фильтр 0.45 мкм пробах воды фотометрическим методом с использованием феррозина) и биогенных элементов по стандартным и апробированным методикам. При этом

аналитические процедуры осуществлялись с учетом всех тонкостей отбора и анализа воды с большим содержанием сероводорода [2], что позволило максимально сократить его потери и получить корректные результаты. Ионный состав воды (сульфаты, хлориды, натрий, калий, магний, кальций) определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором.

Пробы воды отбирали горизонтальным поликарбонатным батометром объемом 5 л на двух станциях в оз. Банное: Вп1 (глубина 5.5 м) и Вп2 (глубина 3.5 м) и на трех станциях в оз. Большие Хрусломены: Нг1 (глубина 18.5 м), Нг2 (глубина 6.5 м) и Нг3 (глубина 4 м). Расположение станций отбора приведено на рисунке.



**Рисунок.** Расположение станций отбора проб воды в озерах Малые Хрусломены (Банное) и Большие Хрусломены в августе 2024 г.

В ходе исследований проведенных в августе 2024 г. установлено, что поверхностные воды обоих озер были прогреты до температуры 19–21°C (в оз. Банное до 2 м, в оз. Большие Хрусломены до 1.5 м). Затем температура начинала уменьшаться, причем, некоторое уменьшение температуры отмечено даже в придонном слое ст. Вп2 (до 16°C), расположенной на открытой относительно мелководной части акватории оз. Банное. Придонный слой воды глубоководной ст. Вп1 имел температуру о 13.5°C.

В оз. Банное вода по всей глубине имела слабую коричневатую окраску – ее цветность составляла 85–90 град. (по хром-кобальтовой шкале), по-видимому, за счет содержания в ней небольшого количества гуминовых веществ. Скорее всего, по этой же причине, но более слабую окраску до глубины 1.5 м имели поверхностные воды оз. Б. Хрусломены (38–39 град.).

Величина pH в оз. Банное изменялась в пределах от 9.05 до 9.97. Столь высокие значения показателя связаны с активным продуцированием кислорода (107–136% насыщения) фитопланктоном в ходе фотосинтеза (наблюдалось цветение озера). В оз. Большие Хрусломены величина pH изменялась преимущественно в интервале 7.1–7.5; на всех трех станциях отмечено возрастание показателя до 7.99–8.06 на глубине 1.5 м (над галоклином).

Озеро Большие Хрусломены в пределах всей обследованной нами акватории характеризовалось четко выраженной стратификацией, наличием термо-, хемо- и галоклина на глубине 2–4 м. В пределах всей акватории наблюдалось четкое сохранение вертикального положения слоев. На всех станциях, даже на наиболее приближенной к морскому краю ст. Нг3, верхние слои воды до глубины 1.5 м имели одинаковую соленость 4.6–4.7 г/л; термоклин начинался на глубине 2.5–3 м; хемоклин (слой сосуществования аэробных и сероводородных вод) занимал глубины от 3.5 до 4.5 м; ниже расположены анаэробные воды, содержащие сероводород. Во всех случаях переход к анаэробным водам сопровождался резким увеличением количества биогенных элементов (аэробные/анаэробные воды): ст. Нг1 – 50/6323 мкг Si/л; 1.40/53.5 мкг N-NO<sub>2</sub>/л; 15.6/10300 мкг N-NH<sub>4</sub>/л; ст. Нг2 – 1.78/263 мкг P-PO<sub>4</sub>/л; 60/7580 мкг Si/л; 1.18/12.5 мкг N-NO<sub>2</sub>/л; н.о./250 мкг N-NH<sub>4</sub>/л; ст. Нг3 – 1.78/10.4 мкг P-PO<sub>4</sub>/л; 55/4240 мкг Si/л; 1.23/5.66 мкг N-NO<sub>2</sub>/л; н.о./520 мкг N-NH<sub>4</sub>/л.

В оз. Большие Хрусломены сероводород фиксировался повсеместно, начиная с глубины 3.5–4.5 м. Даже на ст. Нг3 он появляется сначала в следовых количествах (0.01 мг/л) на глубине 3 м, а ниже, в придонном слое (4 м) его содержание возрастало до 0.12 мг/л. В этом же диапазоне глубин отмечено появление сероводорода по всей акватории озера. По мере нарастания глубины количество его постоянно увеличивается, достигая максимальных значений в придонных горизонтах – 117 мг/л на ст. Нг2 (97 мг/л на этой же глубине (6.5 м) на ст. Нг1) и 603 мг/л на глубине 18.5 м ст. Нг1. Полученные в текущем году данные по содержанию сероводорода в придонном слое глубоководной станции хорошо согласуются с результатами, полученными нами здесь ранее – с 2013 по 2019 гг. [4] и сопоставимы с данными для мериомиктического оз. Трехцветное [5] (Ругозерская губа Кандалакшского залива Белого моря), отделившегося от моря в результате поднятия суши, начавшегося после схода ледника 10–12 тыс. лет назад. Высокие концентрации сероводорода в монимолимнионе, особенно в его нижних горизонтах обусловлены высокой активностью

сульфатредуцирующих бактерий, так по данным [6] скорость восстановления сульфата, увеличиваясь с глубиной, достигала пика в придонных горизонтах (до 0.6–1.1 мкмоль S/л в день). В ходе исследований ионного состава проб воды было установлено уменьшение количества сульфата по мере увеличения глубины озера. Данный процесс сопровождался и изменением сульфатно-хлоридного коэффициента от 126–136 в аэробных водах миксолимниона (что близко к данным для морской воды, разбавленной поверхностным стоком) до 8–9 на глубине 18.5 м. Можно отметить, что полученные данные близки к результатам, приведенным в работе [6].

Появление сероводорода было отмечено в придонных водах на ст. Вп1 оз. Банное, где его концентрации составили 0.40–0.49 мг/л. К активизации процесса сульфатредукции могло привести с одной стороны обогащение придонных горизонтов воды лабильной органикой (мы наблюдали густую зеленую взвесь отмершего фитопланктона в придонных слоях воды на этой станции). С другой стороны, эти придонные воды имели несколько более высокую минерализацию (264  $\mu\text{Sm}$ ), по сравнению с данными для вышерасположенных вод по всей акватории озера (183  $\mu\text{Sm}$ ). Здесь же отмечен повышенный уровень содержания фосфатов – 1046 мкг P-PO<sub>4</sub>/л (190 мкг P-PO<sub>4</sub>/л в верхнем слое воды); нитритов 15.1 и 4.6 мкг N-NO<sub>2</sub>/л и аммония 1490 и 12.9 мкг N-NH<sub>4</sub>/л соответственно. Также возросло в водах придонного горизонта и содержание реакционноспособного железа 14640 мкг/л (1680 мкг/л в вышерасположенных водах). По данным жидкостной хроматографии содержание основных ионов здесь также было повешено, всех кроме сульфатов, содержание которых было почти в два раза ниже по сравнению с вышележащими водами. Можно предположить, что это следствие их расходования в восстановительном процессе, в ходе которого генерируется сероводород. Наличие более минерализованных придонных вод, возможно, является результатом проникновения соленых вод из расположенного рядом соленого оз. Большие Хрусломены сквозь/через неширокую перемычку, разделяющую эти водоемы. Однако это представляется маловероятным. Приливные колебания в оз. Большие Хрусломены 0.20 м, высота перешейка над уровнем озерных вод примерно 0.5–0.8 м, его ширина ~ 80–100 м. С другой стороны известно, что остров Олений был богат родниками, выход которых после изоляции водоема способствовал быстрому заполнению озера пресной водой.

Таким образом, за прошедшие 100–120 лет после антропогенного вмешательства оба озера претерпели существенные изменения. В настоящее время более мелкое полностью изолированное от моря оз. Банное является пресным, воды на открытой части его акватории однородны по всей глубине. Озеро Большие Хрусломены несмотря на то, что морская вода поступает в него переливаясь через порог во время прилива, является меромиктическим водоемом с эвксинной аноксией; в ходе выполненных в

2024 г. работ подтверждена устойчивость меромиктической структуры на всей акватории водоема с сохранением ранее установленных параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 5. С. 517–532.
2. Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322–333.
3. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 401–412.
4. Лосюк Г.Н., Краснова Е.Д., Кокрятская Н.М., Воронов Д.А. Основные гидрологические параметры озера Большие Хрусломены (Кандалакшского залива Белого моря) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием LXXII Герценовские чтения «География: развитие науки и образования». Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена. Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2019 г. Т. 1. С. 334–336.
5. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Вахрамеева Е.А. и др. Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное) // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 784–795.
6. Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. Microbial Processes and Microbial Communities in the Water Column of the Polar Meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast // *Frontiers in microbiology*. 2020. № 11. 1945.

The article presents the results of studies of the lakes Bolshye and Malye Khruslomeny (now lake Bannoe), (Kandalaksha Bay of the White Sea). These lakes were sea bays until the beginning of the 20th century. Currently, Bannoye Lake is completely freshwater, and the lake Bolshye Khruslomeny is a meromictic reservoir with euxinic anoxia.

## **Красиков В.А, Чаркин А.Н, Леусов А.Э.**

(Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: [krasikov.va@poi.dvo.ru](mailto:krasikov.va@poi.dvo.ru))

### **Трассирование субмаринной разгрузки подземных вод и прибрежного апвеллинга в заливе Посьета с помощью естественных изотопов радия (осень 2024)**

#### **Krasikov V.A., Charkin A.N., Leusov A.E.**

(V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, e-mail: [krasikov.va@poi.dvo.ru](mailto:krasikov.va@poi.dvo.ru))

### **Tracing Submarine Groundwater Discharge and Coastal Upwelling in Posiet Bay Using Radium Isotopes (Autumn 2024)**

Ключевые слова: Короткоживущие изотопы радия, возраст радия, субмаринная разгрузка подземных вод, апвеллинг, залив Посьета, Японское море.

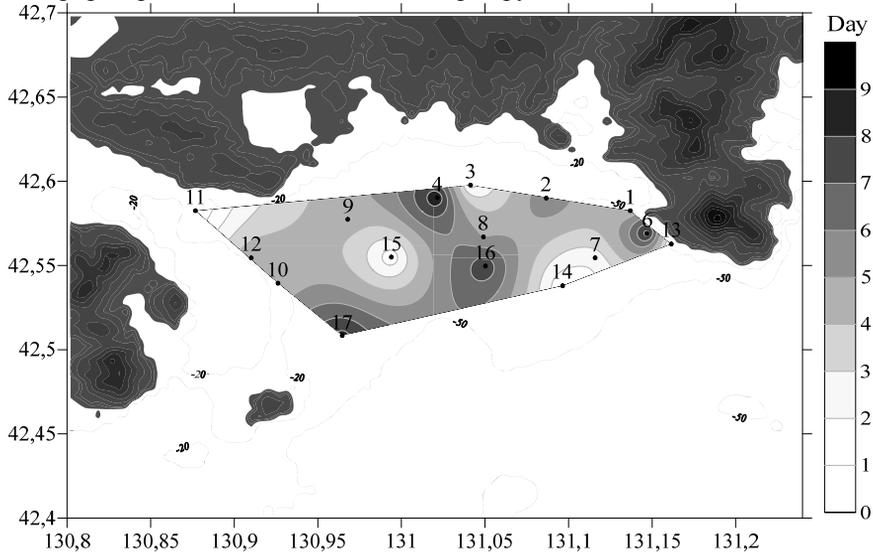
Исследование залива Посьета (ноябрь 2024 г.) с применением короткоживущих изотопов радия ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ) выявило ключевые источники биогенов в условиях зимнего муссона. Радиовое трассирование и расчет "возраста радия" в комплексе с СТД-зондированием и гидрохимией подтвердили апвеллинг холодных соленых вод через каньон Гамова и активный подземный сток (СПВ) у мыса Краббе. Эффективность метода доказана локализацией зон СПВ и апвеллинга, что создает основу для моделирования биогеохимических циклов залива.

Залив Посьета (юго-западная часть залива Петра Великого, Японское море) функционирует как модельная высокопродуктивная мелководная экосистема, где биогеохимические циклы критически зависят от гидродинамических процессов, интенсифицируемых муссонным климатом и стоком реки Туманная. Во время экспедиции ТОИ ДВО РАН в ноябре 2024 г. на НИС «Профессор Гагаринский» были получены результаты на 18 станциях в условиях активного зимнего муссона, которые характеризовались преобладанием северо-западных ветров, способствующих формированию апвеллинга. Для изучения ключевых источников биогенов – прибрежного апвеллинга и субмаринной разгрузки подземных вод (СПВ) – были применены комплексные методики.

Основу методологии составило радиоизотопное трассирование с использованием системы RaDeCC, позволившей детектировать короткоживущие изотопы радия ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $T_{1/2}=11.4$  сут;  $^{224}\text{Ra}$ ,  $T_{1/2}=3.66$  сут) по их дочерним изотомам радона ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ). Радий, активно высвобождающийся при контакте воды с донными осадками и в зонах СПВ, служит уникальным природным индикатором происхождения водных масс и времени, прошедшего с момента их контакта с источником. Расчет «возраста радия» на основе соотношения активностей изотопов Ra с разными периодами полураспада ( $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ ) с использованием доступных

данных предоставил количественную временную характеристику этого контакта. Интеграция радиоизотопных данных с высокоразрешающими гидрологическими профилями CTD-зондирования и стандартным гидрохимическим анализом биогенных элементов ( $N-NO_3$ ,  $N-NO_2$ ,  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$ , Si) позволила картировать пути смешения вод и идентифицировать точечные источники обогащения биогенами.

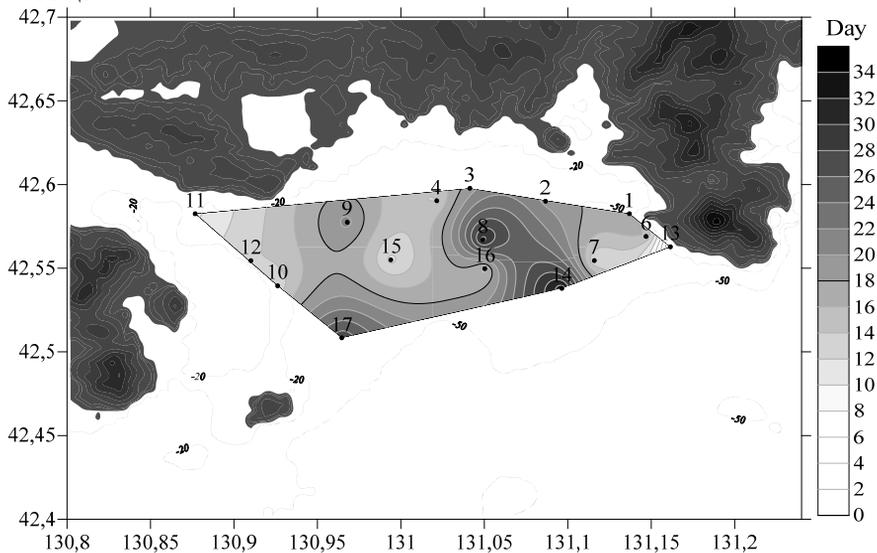
Результаты подтвердили событие апвеллинга, инициированное северо-западными ветрами в северо-восточном секторе залива, проявляющееся адвекцией холодных, соленых вод Японского моря через каньон Гамова. Распределение короткоживущих изотопов радия и рассчитанный «радиевый возраст» в придонном слое указывают на недавний контакт с источником (рис. 1), тогда как максимальный «возраст радия» в регионе, обнаруженный в поверхностном слое апвеллинговых вод (рис. 2), служит радиоизотопным свидетельством этого процесса. Одновременно в районе полуострова Краббе была выявлена зона с экстремально высокими активностями короткоживущих изотопов Ra и минимальным «возрастом радия», интерпретированная как зона активной разгрузки СПВ.



**Рис. 1.** Возраст радия в придонном горизонте

Критически важным стало установление различий в биогенной сигнатуре источников: воды в районе Краббе характеризовались доминированием фосфатов и аммония, что служит индикатором СПВ, тогда как апвеллинговые воды на северо-востоке были обогащены преимущественно нитратами и нитритами. Эта разница в формах азота и соотношении N:P имеет последствия для структуры фитопланктонных

сообществ.



**Рис. 2.** Возраст радия в поверхностном горизонте

Таким образом, исследование локализовало зимнюю зону апвеллинга и выявило зону СПВ у полуострова Краббе, продемонстрировав эффективность подхода, сочетающего радиоизотопное трассирование (с использованием короткоживущих изотопов) с традиционными методами. Полученные результаты формируют основу для дальнейших исследований и потенциальной разработки моделей биогеохимических циклов для залива Посьета.

Научные исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 25–67–00001. Экспедиционные исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания ТОИ ДВО РАН: АААА-А20-120011090005-7.

A November 2024 study of Posiet Bay using short-lived radium isotopes ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ) identified key nutrient sources during winter monsoon conditions. Radium tracing and "radium age" calculations, combined with CTD profiling and hydrochemical analysis, confirmed upwelling of cold saline waters through Gamov Canyon and active submarine groundwater discharge (SGD) near Cape Crabbe. The method's effectiveness was demonstrated by the localization of SGD and upwelling zones, forming the basis for modeling the bay's biogeochemical cycles.

**Леорова Г.А., Мальцев А.Е., Кривоногов С.К.**

(Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск,  
e-mail: [leonova@igm.nsc.ru](mailto:leonova@igm.nsc.ru))

## **Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений минерального озера Учум (Красноярский край)**

**Leonova G.A., Maltsev A.E., Krivonogov S.K.**

(V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk)

## **Biogeochemical features of the formation of Holocene deposits of the mineral lake Uchum (Krasnoyarsk region)**

Ключевые слова: голоцен, минеральные озера, биогеохимия, поровые воды, эвапоритовые минералы, AMS-датирование

Впервые проведены детальные биогеохимические исследования керна бурения (1.7 м) донных отложений минерального оз. Учум, которые выявили ключевые геохимические особенности формирования осадочной толщи и трансформации поровых вод в диагенезе. Установлено, что современные воды озера относятся к сульфатно-натриевому классу с высокой минерализацией (26.2 г/л) и преобладанием  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . Минеральный состав донных отложений характеризуется присутствием аутигенных, эвапоритовых и терригенных минералов. Химический состав поровых вод отражает процессы выщелачивания и анаэробной деструкции органического вещества, а резкие изменения концентрации  $\text{Cl}^-$  указывают на колебания солености водоема в голоцене. AMS-датирование позволило определить возраст осадочной толщи в 2748 кал. л. н.

Минеральные озера – результат деятельности различных природных процессов. Обычно они занимают бессточные котловины, где на протяжении длительного периода их развития образовалось определенное равновесие между поступлением воды и ее испарением. В южной степной части Красноярского края, где расположено оз. Учум, основное питание озера получают за счет подземных вод и атмосферных осадков [1].

Практическое использование минерального оз. Учум началось в глубокой древности. В это время люди начали использовать самосадную соль, накопили опыт применения минерализованной воды и лечебной грязи. С течением времени оз. Учум прочно зарекомендовало себя как эффективный лечебный центр Красноярского края наравне с оз. Шира [1]. Современных научных данных по оз. Учум чрезвычайно мало [1–3]. Геохимические исследования биообъектов, полных разрезов донных отложений и поровых вод оз. Учум никогда не проводились. Нами впервые исследованы биогеохимические особенности формирования донных отложений оз. Учум.

Минеральное бессточное оз. Учум расположено в одной из долин в

северо-западной части Чебаково-Балахтинской котловины, являющейся частью Минусинской межгорной котловины в 30 км южнее г. Ужур (Красноярский край). Климат данной местности резко континентальный. Горный хребет Кузнецкого Алатау препятствует проникновению влажных воздушных масс с западного направления, поэтому потенциальное испарение (600 мм/год) превышает среднегодовое количество осадков (300 мм/год) [3]. Площадь оз. Учум составляет 4.2 км<sup>2</sup>, длина – 4 км, ширина – 1.7 км, глубина – 7.9 м. Озеро расположено на высоте около 400 м над уровнем моря [1].

Согласно классификации по составу главных ионов [4] вода оз. Учум относится к сульфатному классу группе натрия. По окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных  $Eh = +226$  мВ; по щелочно-кислотным условиям – к классу щелочных:  $pH = 9.30$ , по величине минерализации 26.2 г/л – к семейству высокоминерализованных вод [5].

Бурение скважины проведено вибрационным методом поршневым пробоотборником Ливингстона в центральной части оз. Учум (координаты 55°05'43" с. ш., 89°43'34" в. д.) в июле 2022 г. Получен керн длиной 1.7 м с ненарушенной стратификацией. По результатам AMS-датирования калиброванный возраст разреза отложений оценивается в 2748 кал. л. н.

Вскрытый бурением разрез представлен минеральными отложениями: величина зольности (91.60–96.22%), содержание органического вещества (8.40–3.78%). По вещественному составу керн отложений неоднороден. Интервал 0–69 см представлен сильно обводненными озерными илами черного цвета с сильным запахом H<sub>2</sub>S. В интервале 69–75 см обнаружены скопления кристаллов мирабилита. Отдельно выделяется интервал 75–81 см, который сложен полностью тенардитом и мирабилитом с высокими содержаниями Na (27.5%) и валовой S<sub>общ</sub> (19.4%). На глубине 81–170 см залегают плотные озерные илы черного цвета с запахом H<sub>2</sub>S.

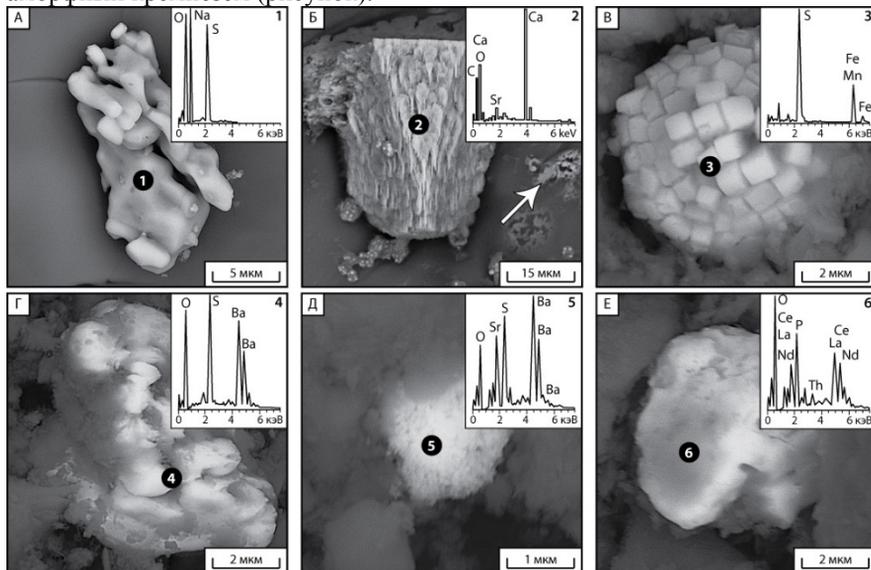
Исследован химический состав продуцентов органического вещества донных отложений (таблица).

Таблица. Химический состав продуцентов органического вещества: планктон (Пл.), водоросли (кладофора) (Вд.), макрофиты (Мк.)

Объект	C, %	H, %	N, %	S, %	C/N	P, %	Al, %	Ca %	Fe, %	K, %	Mg, %
Пл.	48.8	7.1	9.7	1.0	5.0	0.5	0.04	0.18	0.03	0.4	0.73
Вд.	37.2	5.76	2.03	0.8	18.3	0.1	0.7	0.3	0.9	0.9	0.9
Мк.	35.6	5.1	1.4	0.1	25.2	0.1	0.5	1.7	0.3	1.4	1.2
Объект	Mn, г/г	B, г/г	Ba, г/г	Co, г/г	Cr, г/г	Cu, г/г	Zn, г/г	Mo г/г	Ni, г/г	Pb, г/г	Sr, г/г
Пл.	8	279	5.4	0.2	0.46	1.6	28	0.6	1.6	3.6	51
Вд.	242	522	40.3	3.4	20.5	7.3	28.1	0.4	2.5	1.4	525
Мк.	111	1107	60.8	1.2	6.8	2.4	14.1	0.4	4.1	1.6	707

Для планктона характерны максимальные содержания органического углерода (48.85%), водорода (7.11%), азота (9.73%), серы (1.05%), Pb (3.65 г/т), Zn (28.03 г/т) и установлены самые низкие значения отношения C/N (5), а для макрофитов – самые высокие (25.2). Водоросли выделяются повышенным содержанием алюминия (0.70%), железа (0.93%), хрома (20.46 г/т) и меди (7.30 г/т). Макрофиты содержат максимальные концентрации бора (1107.58 г/т), бария (60.82 г/т) и стронция (706.8 г/т).

По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в озерной взвеси, неконсолидированном осадке и донных отложениях оз. Учум был установлен ряд аутигенных минералов: пирит, барит, тенардит, кальцит и аморфный кремнезем (рисунок).



**Рисунок.** Электронно-микроскопические снимки минералов различного

генезиса и их энергодисперсионные спектры. (А) – тенардит ( $\text{Na}_2\text{O} = 41.5$ ;  $\text{SO}_3 = 55.7\%$ ), придонная вода (взвесь на фильтре 0.45 мкм); (Б) – аутигенный кальцит (стрелкой показан аморфный кремнезем), придонная вода (взвесь на фильтре 0.45 мкм); (В) – фрамбоидальный пирит с примесью Mn (0.2%), неконсолидированный осадок; (Г) – аутигенный барит ( $\text{BaO} = 63.2$ ;  $\text{SO}_3 = 34.7\%$ ), 5–10 см; (Д) – аутигенный барит с примесью Sr ( $\text{BaO} = 60.8$ ;  $\text{SrO} = 19.4$ ;  $\text{SO}_3 = 18.8\%$ ), 110–115 см; (Е) – моноцит ( $\text{P}_2\text{O}_5 = 18.5$ ;  $\text{Ce}_2\text{O}_3 = 30.1$ ;  $\text{La}_2\text{O}_3 = 12.6$ ;  $\text{Nd}_2\text{O}_3 = 10.7$ ;  $\text{ThO}_2 = 2.9\%$ ) в органическом матрице, 155–160 см.

В озерной микровзвеси из придонной воды, полученной путем фильтрации на фильтрах 0.45 мкм, было установлено наличие в большом количестве галита и тенардита (рис. А), а также единичные находки

кальцита (рис. Б) и микрочастиц аморфного Si. Пирит встречается практически по всему разрезу донных отложений, однако оформленные фрамбоиды чаще всего обнаруживаются в неконсолидированном осадке, в донных отложениях пирит обычно представлен плохо оформленными фрамбоидами или крупными глобулами. В верхних интервалах керна часто в составе пирита была установлена незначительная примесь Mn (рис. В), в более глубоких горизонтах осадка примесь Mn в пирите не обнаружена. Для верхних интервалов донных отложений характерно присутствие барита (рис. Г), тогда как для нижних – барита со значительной примесью Sr (рис. Д). Тенардит, галит и кальцит имеют хемогенную природу, а пирит, аморфный Si, барит – диагенетическую (образуются в процессе раннего диагенеза). На диагенетическую природу микрочастиц аморфного Si и барита указывает их аморфная форма – они являются агрегатами хлопьевидных частиц, имеющих неплотную структуру, либо сгустками различной степени уплотнения, приуроченных к остаткам органического вещества.

Исследован химический состав поровых вод оз. Учум. Они относятся к сульфатно-натриевому классу согласно [4]. Для поровых вод характерно увеличение  $\text{HCO}_3^-$  до 4.76–6.59 г/л по сравнению с озерной водой (1.59–2.07 г/л). Рост концентраций  $\text{HCO}_3^-$  сопровождается увеличением  $\text{CO}_3^{2-}$  с 0.12–0.84 г/л до 1.20–1.32 г/л в нижних интервалах осадка (110–160 см) и растворенного неорганического углерода, что может косвенно указывать на процессы минерализации органического вещества. Отмечается значительное снижение  $\text{Cl}^-$  в поровой воде центральной части разреза (25–65 см) с 2.41–3.73 до 0.97–1.42 г/л с последующим резким увеличением до 5.2–6.68 г/л в интервале 80–100 см. Ниже по разрезу концентрации хлорид-иона несколько снижаются до 2.46–3.18 г/л и становятся сопоставимы с концентрациями в верхних интервалах осадка. Такое распределение  $\text{Cl}^-$  может косвенно свидетельствовать об изменении степени солености озерных вод на разных этапах развития водоема. Установлен тренд на увеличение концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  с глубиной, что также указывает на изменение уровня солености озерных вод в голоцене. Для  $\text{Ca}^{2+}$  отмечается его неравномерное распределение по разрезу с некоторым снижением до 0.009–0.021 г/л в средней части разреза (40–100 см) и увеличением до 0.013–0.019 г/л в нижней части (100–170 см).

Для поровых вод донных отложений оз. Учум характерно увеличение концентраций не только большинства ионов, но и всех растворенных химических элементов по сравнению с озерной водой. Такой рост можно объяснить, с одной стороны, выщелачиванием ряда элементов из твердой фазы осадка в поровую воду в процессе диагенеза, с другой – ростом солености озерных вод на начальных этапах формирования водоема. Процессы изменения химического состава поровых вод начинаются уже на границе вода–неконсолидированный осадок и продолжают с углублением

в толщу донных отложений. При этом по характеру распределения ряда элементов (Сг, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn) заметно выделяется самый верхний интервал осадка (2–4 см), что может быть отражением антропогенной нагрузки на озерную экосистему в XX–XXI в.в.

Таким образом, проведенные исследования показали, что современные воды оз. Учум относятся к сульфатно-натриевому классу с минерализацией 26.2 г/л, где доминирующими ионами являются  $\text{SO}_4^{2-}$  (9.83–13.04 г/л),  $\text{Na}^+$  (5.87–7.85 г/л) и СГ (2.78–3.84 г/л). Высокие концентрации микроэлементов Li, B, Sr характеризуют гидрогеохимические особенности рапы минеральных озер.

Исследование выполнено по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (проект № 122041400193-7) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусковский В.С., Кривошеев А.С. Минеральные озера Сибири (юг Красноярского края). Новосибирск: Изд-во Наука, 1989. 200 с.
2. Краснов В.А., Артеменко Е.С. Оценка туристического потенциала поселка Озеро Учум Красноярского края // Инновации в науке. 2017. № 5 (66). С. 44–48.
3. Рогозин Д.Ю., Зыков В.В., Иванова Е.А. и др. Меромиктический режим и сезонная динамика вертикальной структуры озера Учум (Южная Сибирь) // Сибирский экологический журнал. 2018. № 2. С. 225–238.
4. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л., Гидрометеиздат, 1953. 296 с.
5. Перельман А.И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 154 с.

For the first time, detailed biogeochemical studies of the drilling core (1.7 m) of bottom sediments of the mineral lake Uchum were carried out, which revealed the key geochemical features of the formation of the sedimentary layer and the transformation of pore waters during diagenesis. It was established that the modern waters of the lake belong to the sulfate-sodium class with high mineralization (26.2 g / l) and the predominance of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  and СГ. The mineral composition of the bottom sediments is characterized by the presence of authigenic, evaporite and terrigenous minerals. The chemical composition of the pore waters reflects the processes of leaching and anaerobic destruction of organic matter, and sharp changes in the concentration of Cl<sup>-</sup> indicate fluctuations in the salinity of the reservoir in the Holocene. AMS dating made it possible to determine the age of the sedimentary layer at 2748 cal. yr BP.

## **Леусов А.Э., Чаркин А.Н.**

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: [leusov.ae@poi.dvo.ru](mailto:leusov.ae@poi.dvo.ru))

### **Влияние разгрузки субмаринных подземных вод на эстуарную биоту губы Буор-Хая (море Лаптевых)**

**Leusov A.E., Charkin A.N.**

(Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok)

### **The Impact of Submarine Groundwater Discharge on the Estuarine Biota of the Buor-Khaya Bay (Laptev Sea)**

Ключевые слова: подземные воды, субмаринная разгрузка, эстуарная биота, Арктика, море Лаптевых, губа Буор-Хая

Обнаруженные в губе Буор-Хая субмаринные подземные воды, под влиянием сторонних факторов оказывают различное влияние на местные биоценозы. Так, в одном случае локальные сообщества подвержены большему угнетению поставляемыми соединениями азота, чем в другом, где описываемые виды не испытывают столь сильных неудобств.

Разгрузка субмаринных подземных вод (СПВ) является общеизвестным явлением, которое способно существенно влиять на гидрологические, гидрохимические и гидробиологические режимы прибрежных морских районов. Однако факт существования такого явления в восточно-арктических морях России был под большим вопросом по причине наличия повсеместно распространенных субаквальных многолетнемерзлых пород, с гидрогеологической позиции, благодаря цементирующему действию подземного льда, являющихся криогенными водоупорами. В 2015 г. в юго-западной части моря Лаптевых была обнаружена зона разгрузки субмаринных подземных вод с оцененной скоростью поступления в  $1.7 \times 10^6 \text{ м}^3$  в сутки, что превышает зимний сток арктической реки Яны. С помощью изотопных и гидрохимических индикаторов было установлено, что данные подземные воды по своему генезису являются подмерзлотными. И на сегодняшний день отсутствовали данные о влиянии разгрузки СПВ подмерзлотного генезиса на арктическую морскую биоту, в первую очередь в эстуарных районах, биологически наиболее продуктивных по сравнению с внутренними районами шельфа.

Как показали наши исследования, поступающие в губу Буор-Хая подземные воды, трассированные с помощью изотопных индикаторов, являются источником биогенных элементов, в особенности аммония, образующегося в анаэробных, в том числе подземных, условиях. Поставка биогенов подземными водами в прибрежную акваторию не раз исследовалась разными специалистами с позиции развития эвтрофикационных процессов, однако в нашем случае были обнаружены

два разнонаправленных вектора развития этих процессов на фоне влияния сторонних факторов.

Так, на ст. 2 были обнаружены более низкие значения аммония по сравнению с другим районом разгрузки, но более высокие концентрации нитрита, который образуется в результате нитрификации (рисунки 1, 2).

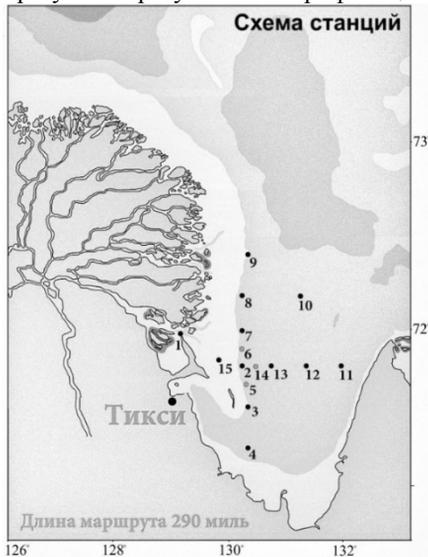


Рис. 1. Схема расположения станций в районе исследования.

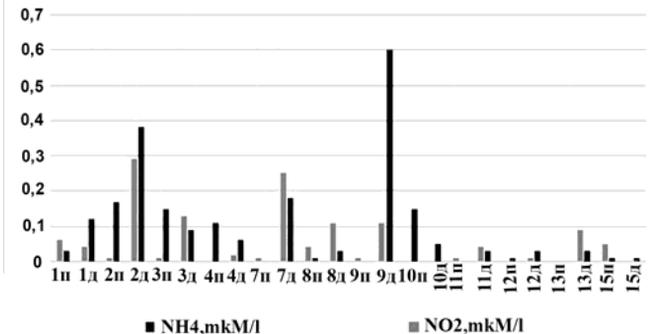


Рис. 2. Распределение содержания биогенных элементов в поверхностном (п) и в придонном (д) горизонтах на станциях в губе Буор-Хая.

Образующийся в большом количестве нитрит окислялся нитратными бактериями в нитраты, что способствовало интенсивному цветению водорослей, в результате чего был зафиксирован дефицит кислорода. Дефицит кислорода способствовал увеличению в эстуарной биоте не

требовательных к кислороду инвазивных (морских) видов, но в целом не угнетал локальную экосистему. Более того, на соседней ст. 7, также находящейся под частичным влиянием разгрузки субмаринных подземных вод, была обнаружена максимальная численность и биомасса зообентоса для всей губы Буор-Хая. Во втором же случае (ст. 9) мы обнаружили, что аммоний, по каким-то причинам не перерабатывается в нитриты и нитраты, при этом локальные биоценозы были сильно угнетены. Вероятным объяснением данного феномена являются литодинамические особенности второго района, так как именно в данном месте формируется современная дельта реки Лены, что обусловлено присутствием квазистационарного взвесенасыщенного потока, подобно одеялу накрывающего подводный склон дельты на данном участке. Данное обстоятельство препятствовало проникновению света ко дну и ограничивало фотосинтез, который в свою очередь является источником кислорода необходимого для нитрификации, что способствовало накоплению аммония в придонном горизонте. Известно, что аммоний — наиболее токсичная форма из всех соединений неорганического азота, что наряду с отсутствием освещения также могло негативно сказаться на местных биоценозах.

Таким образом, было установлено, что наличие разгрузки субмаринных подземных вод, не всегда способствует процветанию прибрежных экосистем. Под влиянием разных гидрологических и литодинамических факторов, могут формироваться условия, способствующие угнетению биоценозов, в том числе, арктических или эстуарных.

Научные исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 25–67–00001. Экспедиционные исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания ТОИ ДВО РАН: АААА-А20-120011090005-7.

The submarine groundwater found in the Buor-Khaya Bay has various effects on local biocenoses under the influence of external factors. So, in one case, local communities are more susceptible to oppression by supplied nitrogen compounds. In another case, despite the lack of oxygen, the biocenoses do not experience such a strong influence.

**Леусов А.Э., Чаркин А.Н., Пипко И.И., Пугач С.П.,  
Дударев О.В., Красиков В.А.**

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
г. Владивосток, e-mail: [leusov.ac@poi.dvo.ru](mailto:leusov.ac@poi.dvo.ru))

**Оценка роли субмаринного подземного стока в  
формировании гидрохимического режима вод Анадырского  
залива Берингова моря (по результатам экспедиции НИС  
«Академик Опарин» осенью 2023 г.)**

**Leusov A.E., Charkin A.N., Pipko I.I., Pugach S.P.,  
Dudarev O.V., Krasikov V.A.**

(Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok)

**Assessment of the submarine groundwater discharge role in the  
formation of the hydrochemical regime of the Anadyr Gulf  
waters of the Bering Sea (based on the results of the RV  
*Akademik Oparin* expedition in the fall of 2023)**

Ключевые слова: Арктика и Субарктика, Берингово море, Анадырский залив,  
разгрузка субмаринных подземных вод

Комплексное исследование Анадырского залива осенью 2023 г. подтвердило  
наличие высокопродуктивных вод Берингова моря, а также показало вероятное  
влияние субмаринных подземных вод на прилегающую акваторию.

Субмаринный подземный сток (также известный как субмаринная  
разгрузка подземных вод) играет важную роль в водном балансе  
прибрежных территорий, влияя на химический состав и экосистемы  
морской среды. Особое значение данного процесса проявляется в  
увеличении биологической продуктивности прибрежных вод за счет  
поставки биогенных элементов.

С целью изучения механизмов формирования высокопродуктивных  
акваторий в морях Северо-Восточной Евразии и оценки их текущего  
экологического состояния с помощью гидрологических, гидрохимических,  
геологических, радиогеохимических и гидробиологических методов осенью  
2023 г. была организована экспедиция на НИС «Академик Опарин» в  
Берингово и Чукотское моря. В северной части Анадырского залива с  
помощью короткоживущих изотопов радия ( $^{224}\text{Ra}$  и  $^{223}\text{Ra}$ ) впервые для  
данного региона была обнаружена разгрузка субмаринных подземных вод.  
В этом же районе в придонном горизонте были обнаружены повышенные  
значения  $\text{pCO}_2$ , очень низкие значения  $\text{pH}$  и растворенного кислорода, но  
при этом очень высокие концентрации биогенных элементов. На этом фоне  
робототехническим комплексом Smart Fish, с помощью предобученной  
нейросети были обнаружены максимальные скопления донных

гидробионтов (таких как крабы, моллюски, морские звезды и т.д.) относительно остальной части Анадырского залива.

Полученные данные подтверждают высокую роль субмаринной разгрузки подземных вод в поставке химических элементов в шельфовую зону Берингова моря, а также в оказании существенного влияния на общую биологическую продуктивность данной акватории.

Научные исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 25–17–00075. Экспедиционные исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания ТОИ ДВО РАН: АААА-А20-120011090005-7.

A comprehensive study of the Anadyr Bay in the fall of 2023 confirmed the presence of highly productive waters of the Bering Sea, and showed the potential impact of submarine groundwater on the adjacent water area.

**Лопатников Е.А.<sup>1,2</sup>, Саттарова В.В.<sup>1,2</sup>, Рябчук Д.В.<sup>2</sup>,  
Григорьев А.Г.<sup>2</sup>, Сергеев А.Ю.<sup>2</sup>, Ким Д.В.<sup>1,2</sup>**

(<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: [sv\\_8005@mail.ru](mailto:sv_8005@mail.ru); <sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург)

**Содержание и особенности распределения редкоземельных элементов в донных отложениях северо-западного шельфа Берингова моря**

**Lopatnikov E.A.<sup>1,2</sup>, Sattarova V.V.<sup>1,2</sup>, Ryabchuk D.V.<sup>2</sup>,  
Grigor'ev A.G.<sup>2</sup>, Sergeev A.Yu.<sup>2</sup>, Kim D.V.<sup>1,2</sup>**

(<sup>1</sup>V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS, Vladivostok; <sup>2</sup>A.P. Karpinsky Russian Research Geological Institute, St. Petersburg)

**Content and distribution features of rare earth elements in bottom sediments of the northwestern shelf Bering Sea**

Ключевые слова: редкоземельные элементы, донные осадки, северо-западная часть Берингова моря

Кратко рассмотрены особенности распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в 93 пробах донных отложений северо-западного шельфа Берингова моря. На основе полученных данных показано, что средние содержания РЗЭ в исследуемых осадках значительно ниже среднего состава в осадочных породах континентов. Проведен статистический анализ, определены корреляционные связи с гранулометрическим составом, органическим углеродом и другими химическими элементами.

Группа редкоземельных элементов (РЗЭ) обладает уникальными свойствами. Их применение в геохимических исследованиях в качестве трассеров источников, процессов и физико-химических условий обусловлено их относительной устойчивостью к изменениям, происходящим при выветривании, денудации, транспортировке, седиментации, диагенезу и метаморфизму. В отличие от многих других элементов, РЗЭ сохраняют свои характеристики в течение длительных геологических периодов, что позволяет использовать их для изучения древних процессов и условий [1]. Они помогают реконструировать палеоклимат и определять источники происхождения морских отложений.

Берингово море – уникальный объект для геохимических исследований. Это один из крупнейших морских бассейнов на Земле, расположенный в субарктической климатической зоне. Его географическое положение, обширная акватория, относительно хорошая связь с Тихим океаном через проливы Алеутской гряды на юге и ограниченное сообщение с Северным Ледовитым океаном через Берингов пролив на севере, формируют уникальные гидрологические условия. Особый интерес для исследователей представляют процессы седиментации, протекающие на шельфе. Влияние

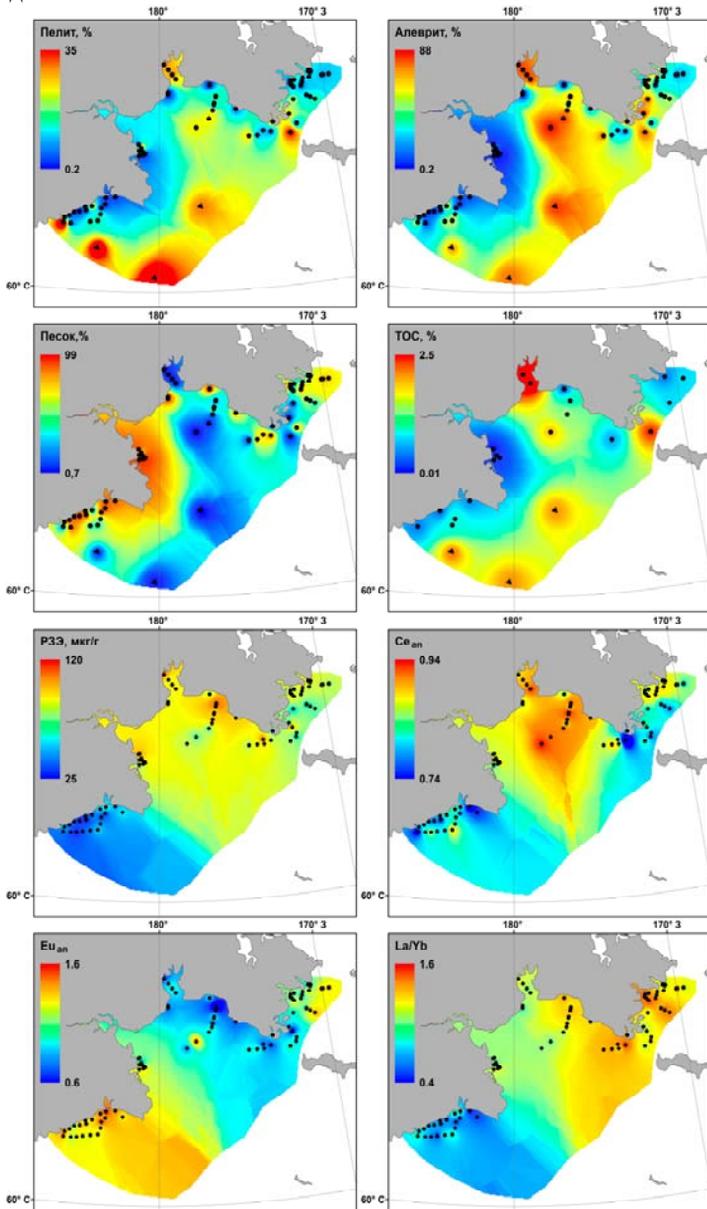
речных вод наиболее заметно в прибрежной зоне на севере моря в летний период, когда происходит таяние льда и увеличивается речной сток. Благодаря своему географическому положению, сезонному появлению морского льда, высокой первичной продуктивности и богатым биологическим ресурсам, Берингово море играет важную роль в глобальном биогеохимическом цикле углерода. Кроме того, побережье Берингова моря входит в состав национальных парков и отличается уникальным сочетанием высокого биоразнообразия. Все это делает Берингово море важным объектом для сохранения и изучения, а геохимические исследования, в частности изучение РЗЭ в осадках, помогают понять процессы, происходящие в этой уникальной экосистеме, и оценить ее уязвимость к изменениям климата и антропогенному воздействию.

В работе на основании данных, полученных с помощью современных высокоточных аналитических методов, сделана попытка проследить закономерности распределения РЗЭ в донных отложениях шельфовой зоны северо-западной части Берингова моря, рассмотреть взаимосвязь лантаноидов с гранулометрическим составом, органическим веществом и другими элементами.

Материалом настоящего исследования являются донные осадки, полученные в трех научных экспедициях на НИС «Иван Киреев» (21Вег, 2021 г.), «Академик М.А. Лаврентьев» (LV63 и LV95, 2013 г. и 2022 г.). Анализ гранулометрического состава алевропелитовых отложений с песчаной фракцией выполнялся на лазерном анализаторе размерности частиц ANALYSETTE 22 (FRITZSCH, Германия) в диапазоне от 0.2 до 2000 мкм в лаборатории Геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток). Определение РЗЭ производилось в Центральной лаборатории Института Карпинского (г. Санкт-Петербург) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре ELAN 6000 DRC-e (Perkin Elmer, США). Для разложения проб использовалось сплавление. Данные для построения карты распределения ТОС были взяты из литературных источников [2, 3]

В Анадырском заливе и северо-западном шельфе Берингова моря до глубин 60–70 м донные отложения преимущественно плохо сортированные, в составе которых отмечается до 70% песчаной и до 20% алеврито-песчаной фракций. Для глубин более 60–70 м в Анадырском заливе характерны пелито-алевритовые отложения [3]. Суммарное содержание РЗЭ в осадках варьирует от 28 до 122 мкг/г, при среднем содержании  $75 \pm 22$  мкг/г, что значительно ниже по сравнению со средним составом в осадочных породах континентов (144.8 мкг/г) [4]. Более высокие содержания РЗЭ отмечаются в осадках, отобранных в районе заливов Креста и Руддера и в восточной части приустьевых шельфа р. Анадырь (рисунок). Отношение легких РЗЭ к тяжелым (La/Yb) колеблется в пределах 0.40–1.62. В осадках шельфовой зоны Мичигменского залива наблюдается обеднение тяжелыми

лантаноидами.



**Рисунок.** Пространственное распределение гранулометрического состава, ТОС, РЭЭ, Се<sub>ан</sub>, Eu<sub>ан</sub>, и La/Yb в донных отложениях северо-западного шельфа Берингова моря.

Величина цериевой аномалии ( $Ce_{an}$ ) варьирует от 0.74 до 0.95, значения европиевой аномалии ( $Eu_{an}$ ) находятся в интервале от 0.62 до 1.57. Рассматривая спектры распределения РЗЭ, нормированные на Северо-Американский сланец (NASC), в донных осадках, можно отметить, что в целом они характеризуются пологим обликком. Статистический анализ данных выявил, что содержание РЗЭ в донных отложениях тесно связано с содержанием алюминия, тория, урана и свинца. Также наблюдается некоторая связь с количеством алевритовой фракции. Однако, органическое вещество в этих отложениях практически не влияет на распределение РЗЭ (таблица). Эти результаты подтверждают предыдущие исследования [4, 5]. Различия в концентрации РЗЭ в разных частях исследуемого района, скорее всего, объясняются наличием минералов, которые попадают в донные отложения при разрушении коренных горных пород.

Таблица. Корреляционная матрица (отмеченные корреляции значимы на уровне  $p < 0,05$ ;  $N=60$ )

	Пелит	Алеврит	Песок	Al	Ni	Cu	Zn	Pb	Th	U	ТОС	РЗЭ
Пелит	1,00											
Алеврит	<b>0,66</b>	1,00										
Песок	<b>-0,75</b>	<b>-0,99</b>	1,00									
Al	0,05	<b>0,30</b>	<b>-0,27</b>	1,00								
Ni	0,08	0,12	-0,12	<b>-0,39</b>	1,00							
Cu	-0,04	-0,08	0,08	-0,06	0,15	1,00						
Zn	<b>0,29</b>	<b>0,46</b>	<b>-0,45</b>	0,19	<b>0,45</b>	0,13	1,00					
Pb	-0,02	0,16	-0,13	<b>0,37</b>	<b>-0,56</b>	-0,06	-0,17	1,00				
Th	0,01	0,13	-0,12	<b>0,54</b>	<b>-0,62</b>	-0,07	0,05	<b>0,81</b>	1,00			
U	0,18	<b>0,44</b>	<b>-0,42</b>	<b>0,54</b>	<b>-0,47</b>	0,02	0,22	<b>0,81</b>	<b>0,87</b>	1,00		
ТОС	-0,10	-0,11	0,11	0,07	-0,11	-0,09	-0,08	-0,05	-0,03	-0,08	1,00	
РЗЭ	0,11	<b>0,22</b>	-0,21	<b>0,67</b>	<b>-0,52</b>	-0,19	0,18	<b>0,65</b>	<b>0,88</b>	<b>0,77</b>	0,04	1,00

Полевые работы, пробоподготовка и аналитические работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 24-77-10058, <https://rscf.ru/project/24-77-10058/>. Обобщение базы данных и обработка полученных данных выполнены при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (проект № 124022100084-8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rock: Influence of provenance and sedimentary processes // Rev. Mineral. Geochem. 1989. V. 21. P. 169–200.
2. Aksentov K., Sattarova V., Lopatnikov E. et al. Features of mercury geochemistry and the dynamics of its accumulation in bottom sediments of the northwestern Bering Sea over the past 150 years // Marine Pollution Bulletin.

2025. V. 215. 117907. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117907>

3. Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В. и др. Литология современных осадков и седиментационные процессы северо-западного шельфа Берингова моря // *Океанология*. 2025. (в печати).

4. Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Владивосток: Дальнаука, 2000. 236 с.

5. Аникиев В.В., Дударев О.В., Колесов Г.М. и др. Распределение и седиментационные потоки химических элементов в системе взвесь–донные осадки для эстуария р. Анадырь–Берингово море // *Геохимия*. 1997. № 3. С. 320–330.

The features of rare earth element (REE) distribution in 93 samples of bottom sediments from the northwestern shelf of the Bering Sea are briefly examined. It is shown that the average REE contents in the studied sediments are significantly lower than in the average composition of continental sedimentary rocks. A statistical analysis was carried out, and correlations with grain-size composition, organic carbon, and other chemical elements were determined.

## **Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М.**

(Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, e-mail: glosyuk@yandex.ru)

### **Соединения восстановленной серы в отделившихся от Белого моря озерах**

## **Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M.**

(N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk)

### **Compounds of reduced sulfur in the lakes separated from the White Sea**

Ключевые слова: отделяющиеся водоемы, донные осадки, сероводород, соединения восстановленной серы.

Представлены данные по содержанию соединений восстановленной серы в осадках озер, находящихся на разных стадиях отделения от Белого моря. В отобранных ядрах наблюдается схожее количество органического вещества, но отличающегося по происхождению. Установлено, что распределение форм серы в составе  $\Sigma S_{H_2S}$  меняется по мере изолирования водоема от моря.

Кольский берег Белого моря имеет фиардово-шхерную береговую линию, а в результате постгляциального поднятия небольшие лагуны и заливы начинают изолироваться от моря и превращаться в озера. В окрестностях Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова биологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ББС МГУ) проводятся исследования таких озер, находящихся на разных стадиях отделения от моря.

Настоящие исследования проводились на пяти таких водоемах: оз. Верхнее Ершовское (N 66° 32.48' E 33° 03.06') и оз. Нижнее Ершовское (N 66° 32.14' E 33° 03.74'), которые уже полностью отделились и стали пресными; оз. Трехцветное (N 66°35.54' E 32°58.73') находится на меромиктической стадии; оз. Кисло-Сладкое (N 66° 32.87' E 33° 08.14') и Лагуна на Зеленом мысе (N 66° 31.80' E 33° 05.65') еще испытывают влияние моря – в них поступает свежая соленая вода с разной периодичностью.

Озеро Верхнее Ершовское (максимальная глубина в озере 4.8 м, средняя 1.5 м) – пресное маломинерализованное озеро, образовавшееся на месте древнего пролива, давно утратившее связь с морем и соединенное через протоку с оз. Нижнее Ершовское (максимальная глубина 2.9 м при средней 1.5 м). Для этих озер характерно формирование сезонной стратификации, характерной для димиктических озер умеренных широт. В озерах периодически во время сезонной стагнации в донной яме появляется и накапливается в придонном слое сероводород. Оз. Трехцветное – водоем, находящийся на меромиктической стадии отделения, максимальная глубина

озера 7.5 м. Его отличительной чертой является наличие слоя ярко-зеленого цвета толщиной 15–20 см, расположенного над хемоклином, образованного массовым развитием аноксигенных фототрофных зеленоокрашенных серобактерий. Содержание сероводорода в придонных слоях достигало огромных значений – до 600 мг/л. Оз. Кисло-Сладкое – соленый водоем со стратифицированной структурой и присутствием сероводорода в анаэробных водах. В осенне-зимний период возможна промывка его свежей морской водой до однородного аэробного состояния. Для данного водоема характерны самые нестабильные гидрохимические показатели, которые определяются климатическим сезоном и степенью промывки. Лагуна на Зеленом мысе имеет постоянный приливной водообмен с морем через небольшой порог. Однако, несмотря на ежедневное поступление свежей морской воды, в наиболее глубокой его части у дна сохраняется небольшая по толщине анаэробная линза, где в достаточно больших количествах накапливается сероводород [1].

Для исследований были отобраны керны донных осадков (ДО) в наиболее глубокой части озер с помощью ударной прямоточной грунтовой трубкой Aquatic Research Instruments (США). Определение различных форм серы проводили по методике систематического фазового анализа, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [2]. Определение массовой доли органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) проводили с использованием анализатора элементного состава (однореакторный вариант, конфигурационный набор CHN) EuroEA3000 (Eurovector S.p.A., Италия). Диапазон измерения массовой доли элемента составляет от 0.01 до 100%. Все концентрации даны в расчете на сухой осадок.

Для исследованных водоемов характерны достаточно высокие значения содержания ОВ в осадках (в среднем по всем исследованным колонкам от 6 до 12%). Такие количества сопоставимы с содержанием ОВ в ДО пресноводных озер Карелии, количество  $C_{\text{орг}}$  в которых составляет около 12% [3]. Высокие значения содержания ОВ в осадках Ершовских озер (в среднем по колонке 7.8 и 12.5% для Верхнего и Нижнего соответственно), скорее всего, связаны с поступлением органики с их водосборной территории, которая значительно заболочена и больше по площади, чем у других исследуемых водоемов. Что подтверждает и показатель C/N (среднее значение для обоих водоемов 8.8). Схожее распределение по колонке ОВ было получено и для других водоемов, но при этом отношение C/N в них заметно ниже – до 6.5 для оз. Кисло-Сладкого и оз. Трехцветное и 4.8 для Лагуны на Зеленом мысе, что позволяет предполагать преобладание в составе ОВ автотонной составляющей. Хотя водосборная площадь этих водоемов также заболочена, но по площади она значительно меньше, чем у Ершовских озер, поэтому и поступление терригенного ОВ также относительно ниже. Особенностью оз. Кисло-Сладкое и Лагуны на Зеленом

мысе является образование большого количества нитчатых водорослей в теплое время года (для оз. Кисло-Сладкого это периодическое явление, а для Лагуны на Зеленом мысе регулярное), которые, отмирая, служат субстратом для поддержания процесса сульфатредукции. В оз. Трехцветном наблюдается высокая продуктивность микроорганизмов в зоне хемоклина, которые отмирая, оседают на дно. Таким образом, при сопоставимых количествах ОВ в осадках исследуемых водоемов оно качественно отличается по происхождению. Так, в пресных Ершовских озерах ОВ представлено преимущественно аллохтонной органикой, имеющей трудно разлагаемую гумусовую природу, что может служить сдерживающим фактором для протекания процессов его деструкции в толще осадков. В то время как в водоемах, находящихся на меромиктической стадии и еще связанных с морем, ОВ в основном продуцируется в водной толще и имеет более доступную для дальнейшего преобразования форму.

В ДО появление сероводорода в результате процесса сульфатредукции сопровождается образованием разнообразных органических и неорганических соединений восстановленной серы, общее содержание которых обычно характеризуют параметром «сумма производных бактериального сероводорода ( $\Sigma S_{H_2S}$ )» [4, 5]. В состав этого показателя входят: сера кислоторастворимых моносulfидов железа ( $S^2$ ), пиритная ( $S_{пир}$ ) и элементная сера ( $S^0$ ), сера в составе органических соединений ( $S_{орг}$ ).

При отделении водоема от моря и переходе к пресному озеру в донных осадках происходят изменения, в том числе и в распределении разных соединений восстановленной серы – продуктов трансформации бактериального сероводорода. По вкладу различных форм серы в состав  $\Sigma S_{H_2S}$  исследуемые водоемы можно разделить на две группы. Первая группа – Ершовские озера, имеют профиль распределения соединений восстановленной серы схожий с другими пресноводными водоемами Субарктической зоны Европейского Севера. Профиль распределения во второй группе – в оз. Трехцветном, оз. Кисло-Сладком и в Лагуне на Зеленом мысе, схож с данными для ДО Белого моря [4, 6].

Основным отличием ДО озер, на меромиктической стадии отделения и связанных с морем, является преобладание пиритной серы в составе  $\Sigma S_{H_2S}$ . В среднем по колонке доля  $S_{пир}$  в оз. Трехцветном составляла около 62% от  $\Sigma S_{H_2S}$ , в оз. Кисло-Сладком – 49%, а в Лагуне на Зеленом мысе – 58%; в более глубоких слоях (ниже 20 см) доля  $S_{пир}$  в осадках доходит до 80, 68 и 77% соответственно. Из всех остальных форм серы заметный вклад принадлежит  $S_{орг}$ : в оз. Трехцветном он оценивался в среднем по колонке 18.5%, в оз. Кисло-Сладком – 46%, а в Лагуне на Зеленом мысе – 29%. При этом максимальные значения  $S_{орг}$  наблюдались в верхних горизонтах и доходили до значений 58, 75 и 64% от  $\Sigma S_{H_2S}$  соответственно. Органическая сера в осадках представлена не только диагенетической серой, но и серой, входящей в состав оседающей на дно мортмассы. Поэтому можно

предположить, что наибольшее количество  $S_{\text{орг}}$  в поверхностных слоях представлено седиментационной серой биогенного происхождения. Судя по значениям отношения  $C/N$ , вероятно, она имеет преимущественно автохтонное происхождение. Схожее распределение соединений в составе  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  наблюдалось и для морских осадков, например, в Черном море доля  $S_{\text{пир}}$  составляла примерно 74%, а  $S_{\text{орг}}$  – 24% [7], в Белом море доля  $S_{\text{пир}}$  составляла в среднем 38%,  $S_{\text{орг}}$  от  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  около 17% [6].

При переходе от морских водоемов к пресноводным меняется доминирующая форма в составе  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$ : лидирующая роль принадлежит уже не пиритной, а органической сере. В осадках Ершовских озер вклад  $S_{\text{орг}}$  в состав  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  составлял в среднем по колонке около 84% от  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  для оз. Верхнее Ершовское и 81% для оз. Нижнее Ершовское. Подобное доминирование  $S_{\text{орг}}$  в составе  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  ранее мы наблюдали в других пресноводных озерах Европейского Севера России, например, озер Архангельской области Масельское, Вильно, Сяргозеро и др. (Каргопольский район), оз. Святое (Коношский район). В этих водоемах содержание  $OB$  было сопоставимо с его количеством в Ершовских озерах ( $C_{\text{орг}}$  10–14%) и также имело преимущественно аллохтонное происхождение (отношение  $C/N$  варьировалось в пределах 8.7–12.3). В распределении соединений восстановленной серы в составе  $\Sigma S_{\text{H}_2\text{S}}$  также преобладала сера, связанная с органическим веществом [8, 9], вклад которой изменялся в диапазоне от 40 до 93% [9], а максимум ее содержания приходился на поверхностные горизонты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 3 С. 401–412.
2. Волков И.И., Жабина Н.Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // *Химический анализ морских осадков* / Под ред. Э.А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
3. Немировская И.А. Содержание и состав органических соединений в отделяющихся озерах в Антарктике и Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 4 (114). С. 76–85.
4. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
5. Остроумов Э.А. О формах соединений серы в отложениях Черного моря // *Тр. Ин-та океанологии АН СССР*. 1953. Т. 7. С. 70–90.
6. Кокрятская Н.М., Волков И.И. Восстановленная сера в донных осадках Белого моря // *Система Белого моря. Т. IV. Седанкообразование, геология и история* / Под ред. Лисицына А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 699–710.
7. Розанов А.Г., Кокрятская Н.М., Гурский Ю.Н. Состав иловых вод и форм соединений серы в донных осадках северо-восточной части Черного моря // *Литология и полезные ископаемые*. 2017. № 4. С. 291–305.

8. Титова К.В. Биогеохимические процессы цикла серы в лимнических экосистемах юга Архангельской области. Дис ... канд. геогр. наук: 25.00.36. С.-Пб., 2015. 216 с.

9. Титова К.В., Кокрятская Н.М. Биогеохимические процессы в донных отложениях водоемов на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 28–44. doi: 10.17076/lim1917.

The data on the content of reduced sulfur compounds in the sediments of lakes at different stages of isolation from the White Sea are presented. The selected sediment cores contain similar amounts of organic matter, but differing in origin. It is established that the distribution of sulfur forms in the composition of  $\Sigma S_{H_2S}$  in sediments changes as lake is isolated from the sea.

**Лукьянова О.Н.<sup>1</sup>, Артамонова К.В.<sup>2</sup>, Варварова А.О.<sup>1</sup>,  
Зубаревич В.Л.<sup>1</sup>, Иванов В.В.<sup>3</sup>, Ключиткин А.А.<sup>1</sup>,  
Мурзакова Ю.В.<sup>1</sup>, Торгунова Н.И.<sup>1</sup>, Чульцова А.Л.<sup>1</sup>,  
Щука А.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва e-mail: [olukian@mail.ru](mailto:olukian@mail.ru) ;

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва; <sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва)

## **Гидролого-гидрохимические особенности вод Баренцева моря в летний и осенний период**

**Lukyanova O.N.<sup>1</sup>, Artamonova K.V.<sup>2</sup>, Varvarova A.O.<sup>1</sup>,  
Zubarevich V.L.<sup>1</sup>, Ivanov V.V.<sup>3</sup>, Klyuvitkin A.A.<sup>1</sup>,  
Murzakova Y.V.<sup>1</sup>, Torgunova N.I.<sup>1</sup>, Chultsova A.L.<sup>1</sup>,  
Shchuka A.S.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, <sup>2</sup>Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, <sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow)

## **Hydrobiochemical conditions of the Barents Sea in summer and autumn seasons**

Ключевые слова: арктические моря, температура воды, соленость, растворенный кислород, биогенные элементы, сезонная изменчивость.

В работе на основе новейших экспедиционных данных, полученных в 86-м, 93-м и 96-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», проанализированы гидролого-гидрохимические условия Баренцева моря для двух сезонов: позднеосенний (ноябрь–декабрь 2023 г.) и летний (июль–август 2017 и 2024 гг.).

Изучение экосистемы арктических морей представляет большой интерес как в связи с глобальными тенденциями изменения климата, так и в связи с изменением условий среды обитания гидробионтов. Гидрохимические параметры могут использоваться как маркеры физических и биологических процессов и служат хорошими показателями для оценки изменчивости морских экосистем.

В Баренцевом море происходит взаимодействие двух разных по своим характеристикам водных масс: юго-западная часть моря находится под влиянием теплых и высокосоленных вод, а в северную часть моря проникают холодные и относительно распресненные воды, для которых характерно почти полное отсутствие горизонтальных градиентов, особенно в промежуточных и придонных слоях [1, 3, 5].

В работе представлены данные, полученные в 68-м (июль–август 2017 г.), в 93-м (ноябрь–декабрь 2023 г.) и 96-м (июль–август 2024 г.) рейсах НИС

«Академик Мстислав Келдыш». Особенности вертикального распределения гидролого-гидрохимических показателей анализировались на пяти океанологических разрезах: западный Норвежско-Баренцевоморский, Кольский меридиан, разрез по 39° в.д., Новая Земля – Банка Ушакова и Новая Земля – Земля Франца-Иосифа (рисунок). Данные вертикального распределения температуры и солености получали при зондировании водной толщи CTD зондом SBE-911plus. Для отбора проб морской воды использовался зондирующий комплекс, включающий в себя 12-литровые батометры Нискина. Гидрохимические показатели определялись непосредственно после отбора проб в судовой лаборатории согласно аттестованным методикам, принятым при анализе морских и пресных вод [2, 4]. Гидрохимический анализ включал определение содержания растворенного в воде кислорода и концентрации биогенных элементов (фосфатов, силикатов, аммонийного, нитритного и нитратного азота).

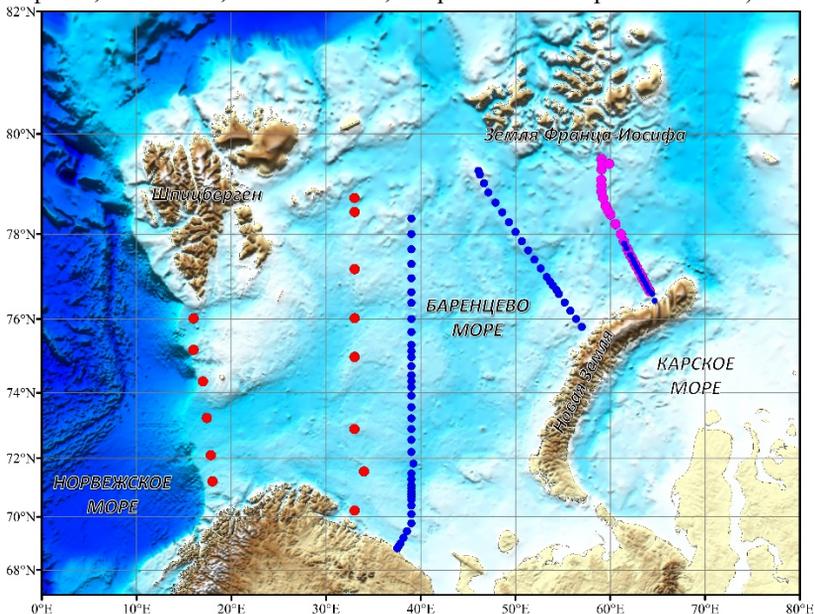


Рисунок. Схема расположения разрезов.

Для летнего распределения в Баренцевом море была характерна сильная пространственная изменчивость. Максимальная температура воды (5–10°C), соленость (более 35.0 епс.) и минимальное содержание кислорода (менее 7.2 мл/л) наблюдались в западной части моря практически во всей толще. Восточнее, на разрезе «Кольский меридиан», температура и соленость уменьшались, а концентрация растворенного кислорода увеличивалась. На самом восточном разрезе тонкий прогретый распределенный (32–33 епс.)

слой составлял только верхние 20 м. Ядро зимнего остаточного слоя с минимальной температурой ( $-1.71^{\circ}\text{C}$ ) находилось на глубине около 50 м на юге и до 110 м на севере. Максимум кислорода (более 9 мл/л) наблюдался на глубине 30–35 м и соответствовал верхней границе холодного (зимнего остаточного) слоя.

В летний период воды Баренцева моря были хорошо аэрированы: максимальные значения наблюдались в поверхностном слое в западной части моря (до 116%) и в подповерхностном (на глубине 10–20 м) – на северо-востоке (до 126%). Глубже происходило уменьшение процентного насыщения растворенного кислорода, при этом в западной части моря в теплых атлантических водах оно оставалось выше (не опускалось ниже 91%), в то время как для остальной части моря уменьшалось до 84%.

Характерной особенностью летнего распределения биогенных элементов были минимальные концентрации в верхнем фотическом слое и резкое их увеличение ниже пикноклина.

Для позднеосеннего периода характерны уменьшение температуры воды во всей толще в западной части моря, наличие теплого промежуточного слоя с минимальным содержанием в нем растворенного кислорода в северо-восточной части.

В ноябре–декабре концентрация растворенного кислорода в поверхностном слое резко уменьшалась по сравнению с летними значениями, слой максимума кислорода отсутствовал, наблюдалось постепенное его уменьшение ко дну. Насыщение вод растворенным кислородом не превышало 100%, что говорит о преобладании деструкционных процессов над продукционными. Концентрации биогенных элементов в верхнем фотическом слое оставались минимальными, но при этом были значительно выше, чем в летний период. Наблюдалось сглаживание вертикальных градиентов и увеличение концентраций биогенных элементов во всей толще по сравнению с летом.

Установлено, что в Баренцевом море по атомарному соотношению силикатов, фосфатов и нитратов образование первичной продукции в летний период лимитирует азот и кремний, для осеннего периода соотношение азота к фосфору становится близким к стехиометрическому [6].

Авторы благодарят весь научный и судовой состав, принимавший участие в получении данных измерений в 68-ом, 93-м и 96-ом рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 182 с.
2. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под. ред. Сапожникова. М.: Изд-во: ВНИРО, 2003. 203 с.
3. Система Баренцева моря / Отв. ред. академик А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
4. Современные методы гидрохимических исследований океана. М. АН СССР. Институт океанологии им. П.П. Ширшова, 1992. 200 с.
5. Экологический Атлас. Баренцево море / ПАО «НК «Роснефть», ООО «Арктический Научный Центр». Москва: Фонд «НИР», 2020. 447 с.
6. Redfield. A.C. On the properties of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton // James Johnstone Memorial Volume. Liverpool. 1934. P. 176–192.

In the present work, we analyzed the distribution of hydrological and chemical characteristics in the Barents Sea for two seasons: late autumn (November–December 2023) and summer (July–August 2017 and 2024), based on the latest expedition data obtained during the 86th, 93rd, and 96th cruises of the RV *Akademik Mstislav Keldysh*.

**Мальцев А.Е., Кириченко И.С., Кривоногов С.К.**

(Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: [maltsev@igm.nsc.ru](mailto:maltsev@igm.nsc.ru))

## **Геохимия донных отложений литоральной зоны озера Иссyk-Куль (Кыргызстан)**

**Maltsev A.E., Kirichenko I.S., Krivonogov S.K.**

(Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk)

## **Geochemistry of bottom sediments of the littoral zone of Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan)**

Ключевые слова: поровые воды, ранний диагенез, озерные отложения, геохимия, аутигенные минералы, соленые озера, Иссyk-Куль

Изучена геохимия раннего диагенеза донных отложений литоральной зоны оз. Иссyk-Куль. Установлено, что, несмотря на низкое содержание органического вещества, в осадках активно протекают восстановительные процессы, что проявляется в изменении химического состава поровых вод, перераспределении по разрезу элементов и формировании ряда аутигенных минералов.

Раннедиагенетические изменения донных отложений контролируются окислительно-восстановительными процессами, которые проявляются: 1) в изменении и превращении форм нахождения элементов в твердой фракции; 2) в изменении состава поровых вод; 3) в перераспределении элементов по вертикали осадка; 4) в обменных процессах на границе раздела вода—дно; 5) в образовании аутигенных минералов [1]. Все перечисленные изменения минеральной составляющей осадков происходят за счет энергии химических процессов деструкции и минерализации органического вещества (ОВ) [2].

Слабосоленое озеро Иссyk-Куль одно из крупнейших горных озер мира, расположенное в Иссyk-кульской котловине в Северном Тянь-Шане. Хотя научные исследования Иссyk-Куля имеют долгую историю в части гидрологии и гидрофизики, условий формирования химического состава воды бассейна и осадконакопления, детальные геохимические исследования донных отложений и их преобразование в раннем диагенезе практически не проводились.

Так как оз. Иссyk-Куль, расположено в межгорной впадине, оно характеризуется слабым развитием зоны активного седиментогенеза, которая располагается узкой полосой вдоль его побережья [3]. Основную роль в процессе осадконакопления озера играет материал терригенного происхождения, поэтому донные отложения почти не содержат ОВ. Присутствие ОВ в донных отложениях определило выбор точек отбора проб. В результате были опробованы небольшие бухты и заливы в прибрежной части озера. Отбор проб для геохимических исследований

осуществлялся в июле–сентябре 2021 и 2023 гг. в разных районах озера, в 10–15 м от берега, а также с борта надувной лодки с использованием батометра (рис. 1).

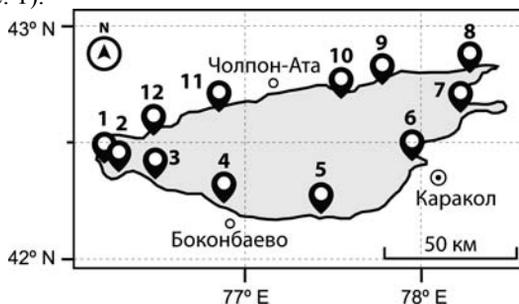
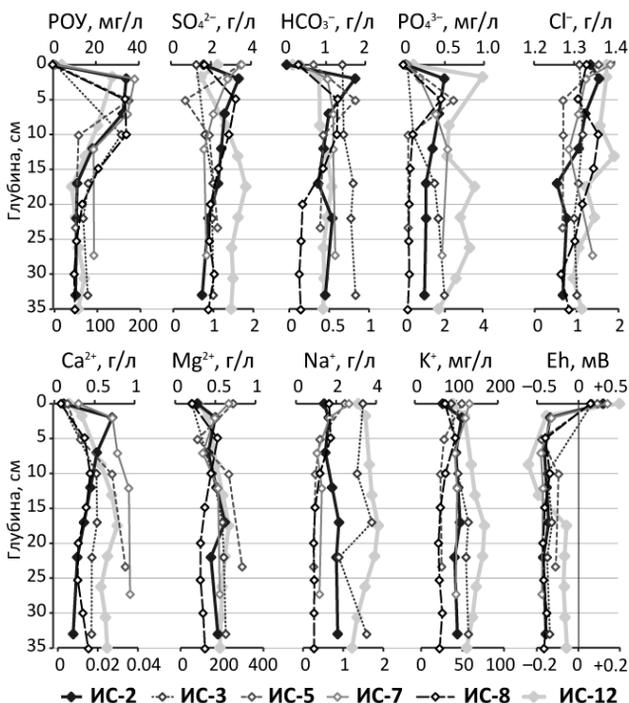


Рис. 1. Карта района исследования и номера станций отбора проб.

Поверхностные воды оз. Иссык-Куль в момент отбора по преобладающим ионам относятся к хлоридно-сульфатному классу группы натрия, по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ( $E_h$  от +0.195 до +0.276 В), по щелочно-кислотным условиям – к классу щелочных (рН от 8.6 до 8.7), по величине общей минерализации (5.6–6.7 г/л) – к семейству солоноватых вод. Величина общей щелочности озера обусловлена главным образом содержанием анионов  $\text{HCO}_3^-$  (0.28–0.36 г/л) и частично —  $\text{CO}_3^{2-}$  (0.02–0.19 г/л). Разность в ионном составе и общей минерализации озерных вод из разных точек отбора, помимо влияния физико-географических и гидрологических факторов, может быть обусловлена поступлением в озеро на восточных и южных участках побережья подземных вод с высоким содержанием хлоридных, сульфатных и натриевых ионов [4].

Жидкая фаза донных отложений (поровые воды), в целом, наследует химический состав озерных вод (рис. 2). Однако имеет и ряд отличий. Это, прежде всего, уменьшение общей минерализации для точек ИС-2, ИС-3 и ИС-7, обусловленное значительным снижением доли  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$ , что может быть связано со спецификой поглощающего комплекса осадка. Рост минерализации и содержания основных катионов отмечается для точек ИС-5, ИС-8 и ИС-12. Для большинства донных отложений характерно снижение вниз по разрезу содержаний  $\text{SO}_4^{2-}$ , РОУ и рост значений  $\text{HCO}_3^-$ , что является следствием проходящих в осадках процессов бактериальной сульфатредукции и микробной деструкции ОВ. Помимо этого, для всех донных отложений характерно снижение значений рН с щелочных до нейтральных (7.1–7.6), а также сильно восстановительные условия среды ( $E_h$ ): –150 от до –352 мВ. Такое изменение физико-химических параметров также является следствием активной микробной деятельности.



**Рис. 2.** Распределение РОУ и ионов в озерных (0 см) и поровых водах.

Особенностью поверхностных вод оз. Иссык-Куль является очень низкое содержание растворенного органического углерода (РОУ). В озерных водах основу общего растворенного углерода составляет неорганический растворенный углерод (РНУ). Для поровых вод характерно увеличение РОУ до 6–140 мг/л в первых 10 см (с последующим снижением), что является следствием деструкции органического вещества. Однако малые содержания ОВ в осадках озера не позволяют органическим формам углерода преобладать над его минеральными формами (исключение точка ИС-1).

Для поровых вод характерно увеличение содержаний почти всех химических элементов в сравнении с озерной водой (табл.). Это является следствием преобразования донных отложений в раннем диагенезе: процессы выщелачивания, катионного обмена, деструкции ОВ и т.д. Для поверхностных вод оз. Иссык-Куль характерны, прежде всего, изменения в широких пределах содержаний Fe и Mn на уровне 45–570 мкг/л и 2–120 мкг/л, соответственно. А также довольно высокие содержания Si равные 2480–7200 мкг/л. Озерные воды в точке отбора ИС-8 характеризуются довольно высокими содержаниями Al на уровне 248 мкг/л.

Таблица. Распределение элементов в озерных (0 см) и поровых водах (мг/л).

ИС-2	Al	Ba	Cu	Fe	Mn	Mo	Pb	Si	Sr	Zn
0 см	0.01	0.04	0.001	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	5.08	5.08	0.02
2 см	1.09	0.21	0.048	1.74	0.28	0.41	0.020	9.70	9.70	0.09
7 см	0.71	0.14	0.026	1.07	0.16	0.23	0.015	7.86	7.86	0.06
12 см	0.57	0.12	0.044	0.94	0.57	0.22	0.012	7.45	7.45	4.17
17 см	0.43	0.09	0.063	0.80	0.97	0.21	0.009	7.04	7.04	8.29
22 см	0.71	0.07	0.055	1.16	1.00	0.17	0.017	5.29	5.29	2.72
33 см	0.57	0.08	0.059	0.98	1.08	0.19	0.013	6.16	6.16	5.50

Химический и минеральный состав донных отложений оз. Иссык-Куль формируются в результате протекания трех основных процессов: 1. поступление в озеро терригенного материала и растворение коллоидного органического вещества с водосбора; 2. накопление автохтонного ОВ; 3. образование минеральных и органоминеральных соединений. При сравнении распределения химических элементов в донных отложениях видно (рис. 3), что осадки имеют специфику и закономерности в накоплении Ca, Sr, U, Br, Ti, Fe Mn, и Mo. Это определяется, в первую очередь, внутриводоемными условиями озера: высокая минерализация воды, щелочные значения pH и т.д. Накопление в современных осадках оз. Иссык-Куль Pb и Sb связано с антропогенной нагрузкой на озерную экосистему в XX и XXI веках.

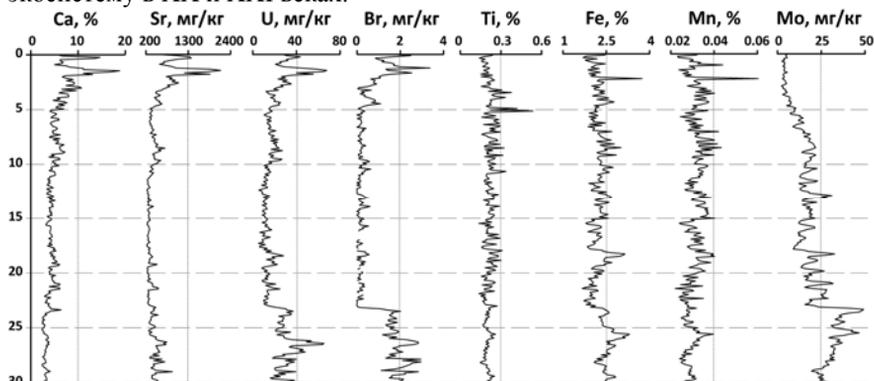


Рис. 3. Распределение химических элементов по разрезу донных отложений точки ИС-6.

По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в современных донных отложениях оз. Иссык-Куль был установлен ряд аутигенных минералов: пирит, кальцит, сидерит, Са-родохрозит, барит и

аморфный кремнезем. Также были обнаружены: кварц, хлорит, плагиоклаз, КППШ, моноцит, биотит, мусковит, циркон, фосфаты кальция и железа, а также интерметаллиды Cr-Ni, которые, по-видимому, имеют техногенную природу. Особенностью донных отложений оз. Иссык-Куль является повсеместное присутствие карбонатов кальция, аморфного кремнезема и большого количества фрамбоидального пирита. Присутствие данного ряда минералов в осадке связано как с химическим составом озерных вод, так и с ее повышенной минерализацией, что при участии ряда микроорганизмов (сульфатредуцирующих, гетеротрофных и т.д.) может приводить к образованию аутигенного кальцита, барита и пирита [5].

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400193-7. Аналитическая часть исследования выполнена в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 — ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berner R.A. Early diagenesis: a theoretical approach. Princeton University Press, 1980. 241 p.
2. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
3. Титова Ю.А. Гранулометрический состав донных отложений озера Иссык-Куль // Вестник КНАУ. 2021. № 1 (55).
4. Асанкулов Т.А., Абудувайли Ц., Исанова Г.Ж. и др. Многолетняя динамика и сезонные изменения гидрохимии бассейна оз. Иссык-Куль (Кыргызстан) // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 1 (78). С. 79–87.
5. Krivonogov S., Maltsev A., Zelenina D., Safonov A. Microbial Diversity and Authigenic Mineral Formation of Modern Bottom Sediments in the Littoral Zone of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia) // Biology. 2023. № 12(8). 1109.

The geochemistry of early diagenesis in the littoral zone bottom sediments of Lake Issyk-Kul has been studied. It has been established that, despite the low organic matter content, active reductive processes occur in the sediments. These processes are manifested by changes in the chemical composition of pore waters, redistribution of chemical elements throughout the section, and the formation of authigenic minerals.

**Мигдисова И.А., Демина Л.Л., Клювиткин А.А.,  
Стародымова Д.П., Лукьянова О.Н.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:  
[migdisova.ia@ocean.ru](mailto:migdisova.ia@ocean.ru));

## **Микроэлементы в зоопланктоне Норвежско-Гренландского бассейна**

**Migdisova I.A., Demina L.L., Klyuvitkin A.A.,  
Starodymova D.P., Lukianova O.N.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

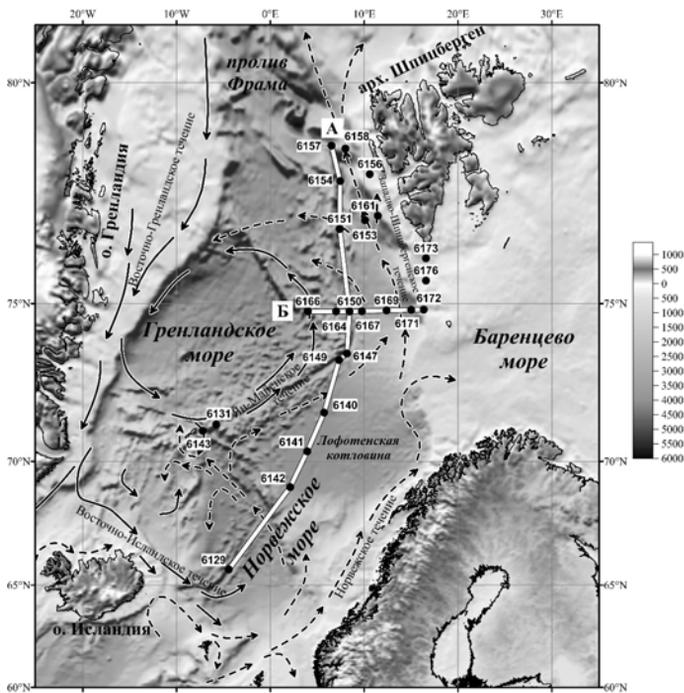
## **Trace elements in the zooplankton of the Nordic Seas**

Ключевые слова: Норвежское и Гренландское моря, Шпицберген, копеподовый зоопланктон, микроэлементы, хребты Колбейнсей и Мона

Получены первые данные о концентрациях микроэлементов в арктическом зоопланктоне Copepoda *Calanus spp.*, собранном в Норвежско-Гренландском бассейне. Установлена изменчивость содержаний Fe, V, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Ba в организмах на субмеридиональном (через Лофотенскую котловину и область хребтов Колбейнсей, Мона и Книповича) и широтном (по 75° с.ш.) разрезах.

Зоопланктон играет ключевую роль в морских экосистемах, являясь главным звеном в передаче энергии от фитопланктона к организмам более высоких трофических уровней. Геохимическая функция зоопланктона заключается в концентрировании и рециклинге микроэлементов при метаболизме и переносе по пищевой цепи. Согласно учению А.П. Лисицына о биодифференциации рассеянного осадочного вещества в океане, седиментологическая функция зоопланктона обусловлена поглощением органоминеральной взвеси при безвыборочной фильтрации и участием в формировании вертикальных потоков частиц [1]. В высокоширотных морях наиболее массовой группой являются травоядные веслоногие рачки копеподы *Calanus spp.*, составляющие до 98% сухой биомассы зоопланктона [2]. Высокое содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) позволяет считать арктический копеподовый зоопланктон основным транспортным механизмом органического вещества в донные осадки [2]. На содержание и характер пространственного распределения тяжелых металлов в зоопланктоне Арктических морей определенное влияние оказывает биопродуктивность, концентрация взвеси и циркуляция водных масс [3–5].

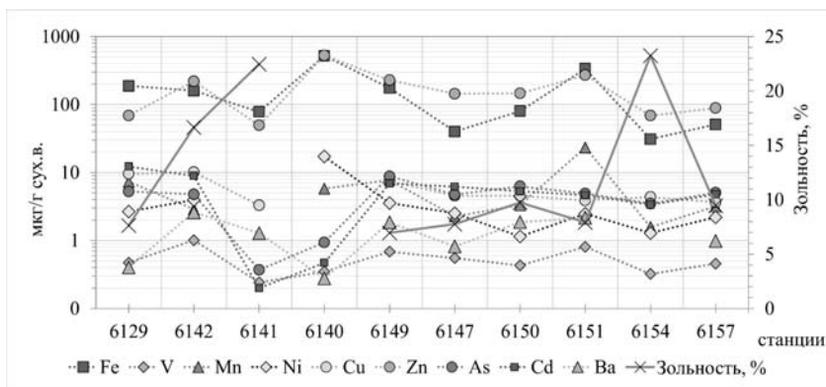
Целью работы являлось изучение пространственного распределения ряда микроэлементов (Fe, V, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Ba) в организмах *Calanus spp.* на двух разрезах, проходящих через Норвежско-Гренландский бассейн. Отбор вещества проводили летом 2019 г. в 75-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (ИО РАН) на 23-х станциях в различных частях Норвежского и Гренландского морей (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема расположения станций пробоотбора зоопланктона на двух разрезах – субмеридиональном (А) и широтном (Б).

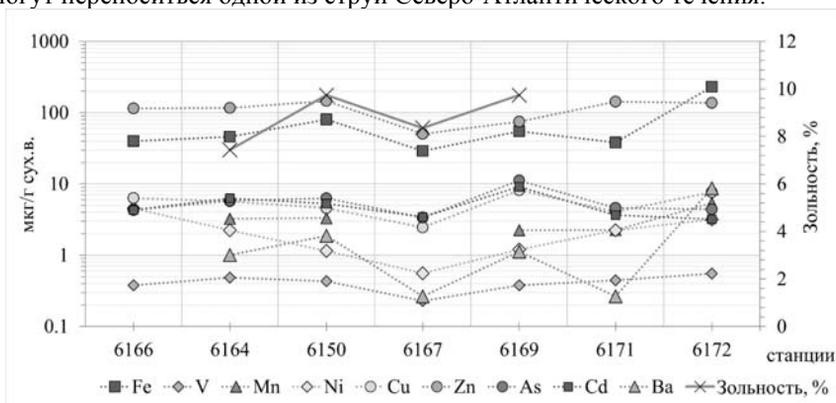
Зольность, эквивалентная суммарному содержанию минеральных компонент, составляет в среднем 14%, повышенные ее значения в зоопланктоне (17–23%) в центре Лофотенской котловины (станции 6141, 6142) и в северной части разреза (ст. 6154) означают пониженное содержание  $C_{org}$  в зоопланктоне. Оно совпадает в некоторых случаях с пониженными содержаниями микроэлементов. Содержания микроэлементов варьируют в пределах трех десятичных порядков величин – от  $n10^{-1}$  мкг/г сух. в. (Cd, V) до  $n10^2$  мкг/г сух. в. (Zn, Fe). Следует отметить, что такие биоактивные металлы как Mn, V, Ni, Cu и потенциально токсичные As и Cd показывают сходный уровень концентраций.

На субмеридиональном разрезе (рис. 2) в Лофотенской котловине (ст. 6141) в копеподах отмечены пониженные и минимальные концентрации большинства элементов (V, Cu, As, Cd, Ba, Mn и Ni), что можно объяснить отсутствием в этом районе гидротермальных источников, метановых сипов и континентального стока. Повышенные содержания Fe, Zn и Ni отмечены на ст. 6140, что может объясняться максимальной близостью этой станции к основной струе Ян-Майенского и Западно-Шпицбергенского течений [6].



**Рис. 2.** Распределение микроэлементов и зольности в зоопланктоне на субмеридиональном разрезе (ориентировка Ю-С).

Максимальные содержания Fe, V, Mn, Cu, Cd и Ba в зоопланктоне восточной части широтного разреза (рис. 3) на шельфовой ст. 6172 могут быть обусловлены более благоприятными трофическими условиями вследствие активного развития фитопланктона и повышенного содержания взвеси. В центре разреза вблизи хребта Книповича (ст. 6167) зарегистрированы минимумы концентраций Fe, V, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Ba. Их повышение на ст. 6150 вероятно обусловлено влиянием гидротермальных плюмов из источников поля Локи Каствл [7], которые могут переноситься одной из струй Северо-Атлантического течения.



**Рис. 3.** Распределение микроэлементов и зольности в зоопланктоне на широтном разрезе по 75° с.ш. (ориентировка З-В).

Средние концентрации биоактивных элементов Fe, Mn, Ni, Zn на субмеридиональном разрезе, испытывающем влияние многообразных источников поступления элементов, в 1.5–2 раза выше, чем на широтном.

Для остальных элементов различия незначительные, тогда как среднее содержание Ва в 1.5 раза выше на широтном разрезе. Среднее содержание  $C_{орг}$  в зоопланктоне на обоих разрезах составило 47.3%, показывая близость с литературными данными (49%) [8]. Характер пространственной изменчивости микроэлементов свидетельствуют об их опосредованной связи с гидрологической структурой и такими показателями среды обитания, как продукционная активность фитопланктона и содержание взвеси.

Авторы благодарят капитана Ю.Н. Горбача и экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш», а также А.С. Соломатину за участие в сборе планктона и А.И. Коченкову за предоставление данных по концентрации водной взвеси. Экспедиционная работа выполнена с использованием оборудования НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» (<https://tv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>) в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема № FMWE-2024-0020). Аналитическая обработка и интерпретация данных проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-00334).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли. // *Мировой океан*. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Л.И. Лобковский, Р.И. Нигматулин (ред.). М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
2. Дриц А.В., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д. и др. Потоки осадочного вещества в Лофотенской котловине Норвежского моря: сезонная динамика и роль зоопланктона // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 4. С. 576–594.
3. Демина Л.Л., Соломатина А.С., Абызова Г.А. Тяжелые металлы в зоопланктонных организмах Баренцева моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47 № 4. С. 62–75.
4. Ritterhoff J., Zauke G.P. Trace metals in field samples of zooplankton from the Fram Strait and the Greenland Sea // *Science of The Total Environment*. 1997. V. 199. № 3. P. 255–270.
5. Zauke G.P., Schmalenbach I. Heavy metals in zooplankton and decapod crustaceans from the Barents Sea. // *Science of The Total Environment*. 2005. V. 359. № 1. P. 283–294.
6. Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Starodymova D.P. et al. Sinking Particle Fluxes at the Jan Mayen Hydrothermal Vent Field Area from Short-Term Sediment Traps. // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. V. 12. № 12. 2339. <https://doi.org/10.3390/jmse12122339>
7. Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygård T.E. et al. Hydrothermal activity at the

Arctic Mid-Ocean Ridges. // Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 2023. V. 188. P. 67–89.

8. Лобус Н.В. Элементный состав зоопланктона Карского моря и заливов восточного побережья Новой Земли. // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 890–900.

The first data on the trace elements concentrations in the Arctic zooplankton Copepoda *Calanus spp.* have been obtained in the Nordic Seas. Concentration variability of Fe, V, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Ba in Copepoda's organisms has been established in the submeridional (through the Lofoten basin and the area of the low-spreading Kolbeinsey, Mona, and Knipovich ridges) and latitudinal (75°C) transections.

**Моисеева Ю.А.**

(«Научно-технологический университет «Сириус», федеральная территория «Сириус», e-mail: [jamoiseeva@mail.ru](mailto:jamoiseeva@mail.ru))

**Особенности микроэлементного состава устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Черного моря  
Moiseeva Yu.A.**

(Sirius University of Science and Technology, Federal Territory «Sirius», Russia)

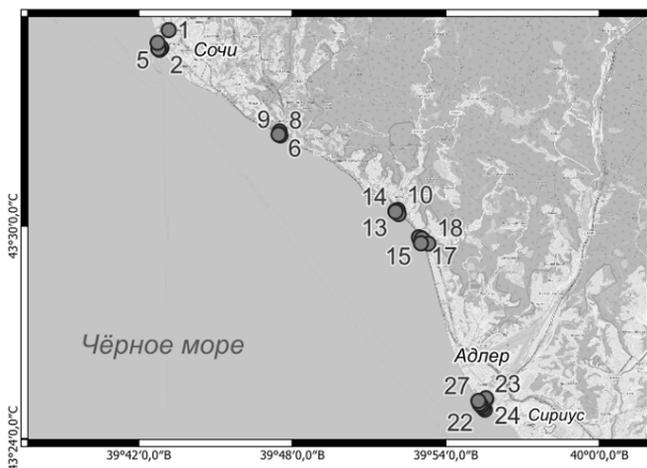
**Features of the trace element distribution in the estuaries of minor and medium rivers of the North-Eastern part of the Black Sea**

Ключевые слова: устьевые области рек, Черное море, химический состав вод, микроэлементы, редкоземельные элементы

Микроэлементный состав рек и устьевых зон играет ключевую роль в понимании природных геохимических процессов и оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы. Изучение микроэлементного состава вод устьевых областей было выполнено основе отобранных речных и прибрежных вод рр. Мзымта, Хоста, Кудепста, Мацеста, Сочи.

В формировании качества прибрежных вод и поддержании продуктивности морских экосистем, связанной с поступлением биогенных элементов и микроэлементов, играет ключевую роль транспорт и трансформация химического состава речных вод в устьевых зонах, определяя перенос и распределение веществ в системе «река–море». [1–3]. Таким образом, устья рек приобретают особое значение в миграции химических элементов, включая вредные вещества, и их выноса в море. Целью исследования является выявление характерных особенностей микроэлементного состава в устьевых зонах средних и малых рек северо-восточной части Черного моря.

Пробы речных и прибрежных морских вод были отобраны в начале ноября в сезон осенне-зимних паводков в устьевых зонах рр. Сочи (т. 1–5), Мацеста (т. 6–9), Хоста (т. 10–14), Кудепста (т. 11–19) и Мзымта (т. 20–28) (рисунки). Все пробы воды предварительно были отфильтрованы через мембранный фильтр 0.45 мкм. Определение микроэлементного состава вод выполнялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).



**Рисунок.** Карта-схема расположения точек отбора проб в устьевых областях рек северо-восточной части Черного моря.

В результате были выявлены наибольшие концентрации основного спектра микроэлементов в р. Мацеста, в частности ртуть и йод, концентрации которых в других реках ниже предела обнаружения, что связано с гидрогеологическими особенностями бассейна р. Мацеста. Минимальные концентрации микроэлементов зафиксированы в реках Мзымта и Хоста. Исключение составляют Al и Ni. Максимальная концентрация Al отмечена в р. Сочи (5.64 мкг/л), тогда как в рр. Хоста и Мацеста его содержание было сопоставимым (4.5 и 4.8 мкг/л соответственно). Концентрация Ni достигает наибольших значений в р. Мацеста (3.2 мкг/л), а в рр. Хоста и Кудепста его концентрации одинаковы (2.4 мкг/л). Для всех исследуемых рек в переходной зоне река-море выявлен неконсервативный тип поведения для микроэлементов, концентрации которых выше в речных водах, чем в морских. При этом для таких элементов как Fe, Al, Ni динамика этого снижения происходит на 70–90% уже при минерализации 4 г/л, а для Mn, Cu, Zn на 30–50% при минерализации до 10 г/л.

Содержание суммы редкоземельный элементов (РЗЭ) в исследуемых водах колеблется в пределах 0.01–0.64 мкг/л. Наибольшие концентрации отмечены в реках Сочи (до 0.64 мкг/л) и Мацеста (0.61 мкг/л), при этом средние значения в их устьевых участках составляют около 0.25–0.26 мкг/л, что сопоставимо с показателями р. Мзымта. Минимальные концентрации зарегистрированы в реках Хоста (0.1 мкг/л) и Кудепста (0.06 мкг/л). Особенности распределения РЗЭ могут служить индикатором как природных геохимических процессов взаимодействия вода–порода, так и

антропогенного воздействия. В случае Мацесты дополнительным фактором является влияние термальных вод, богатых редкими элементами, чья мобилизация усиливается благодаря присутствию сероводорода и бикарбонатов. Для р. Сочи значимым фактором стало искусственное укрепление русла, ограничивающее естественное разбавление вод и способствующее накоплению антропогенных примесей, включая РЗЭ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. Маккавеев П.Н., Завьялов П.О. Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод // Система Черного Моря. М.: Научный мир, 2018. С. 287–321.
3. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

Microelement composition of rivers and estuarine zones plays a key role in understanding natural geochemical processes and assessing anthropogenic impact on aquatic ecosystems. The study of microelement composition of estuarine waters was carried out on the basis of selected river and coastal waters of the Mzymta, Khosta, Kudepsta, Matsesta, and Sochi rivers.

**Моргунова И.П.<sup>1</sup>, Литвиненко И.В.<sup>1,2</sup>, Куршева А.В.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, e-mail i.morgunova@vniio.ru;  
<sup>2</sup>СПбГУ, Институт Наук о Земле, г. Санкт-Петербург)

**Углеводородные молекулярные маркеры, как индикаторы разгрузки газовых флюидов в четвертичных отложениях впадины Дерюгина (Охотское море)**

**Morgunova I.P.<sup>1</sup>, Litvinenko I.V.<sup>1,2</sup>, Kursheva A.V.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>FSBI “VNIIOkeangeologia”, Saint-Petersburg; <sup>2</sup>SPbSU, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg)

**Hydrocarbon molecular markers as indicator of gas seepage in Quaternary sediments of the Derugin’s depression (Sea of Okhotsk)**

Ключевые слова: Охотское море, четвертичные осадки, рассеянное органическое вещество, углеводородные молекулярные маркеры, холодные газовые флюиды.

Детальное изучение группового и молекулярного состава ПОВ в плейстоцен-голоценовых отложениях Охотского моря в районе поднятия Кашеварова – впадины Дерюгина позволило охарактеризовать основные источники, фациальные условия осадконакопления и особенности органо-геохимического фона акватории в зоне, характеризующейся разгрузкой холодных газовых флюидов.

Региональная особенность осадконакопления в Охотском море заключается в первичной седиментационной неоднородности формирующихся осадков, которая определяется высокой биопродуктивностью его водной толщи и сложным гидрологическим режимом, поставляющим терригенный материал с речным стоком [1]. Важную роль в поставке первичной продукции в четвертичное время играли часто сменяющиеся периоды гляциации–дегляциации [2].

Осадочные разрезы отбирали на глубинах моря 513–1650 м, в интервалах отбора 0–260 см в ходе рейса НИС «Профессор Мультиановский» в 2023 г. Изученные колонки располагаются на поднятии Кашеварова (ПМО-2307) и на склоне, расположенном между поднятием и впадиной Дерюгина (ПМО-2306, ПМО-2311 (дно каньона), ПМО-2317; рисунок). Разрез ПМО-2319 отобран из наиболее глубоководной части впадины Дерюгина, где были выявлены холодные газовые флюиды и баритовые постройки [3]. Изученные осадки (преимущественно пелиты и алевропелиты) содержат включения (песок, обломки моллюсков, полихеты, афиуры, примазки гидротроилита и запах сероводорода) указывающие на влияние, как эндогенных, так и экзогенных факторов на депонированное в них ОВ. Баритовые постройки, как правило, окружены обширными зонами мягких биотурбированных осадков, населенных двустворчатými моллюсками (*Calypptogena sp.* и *Acharax sp. (Solemyidae)*), биологический

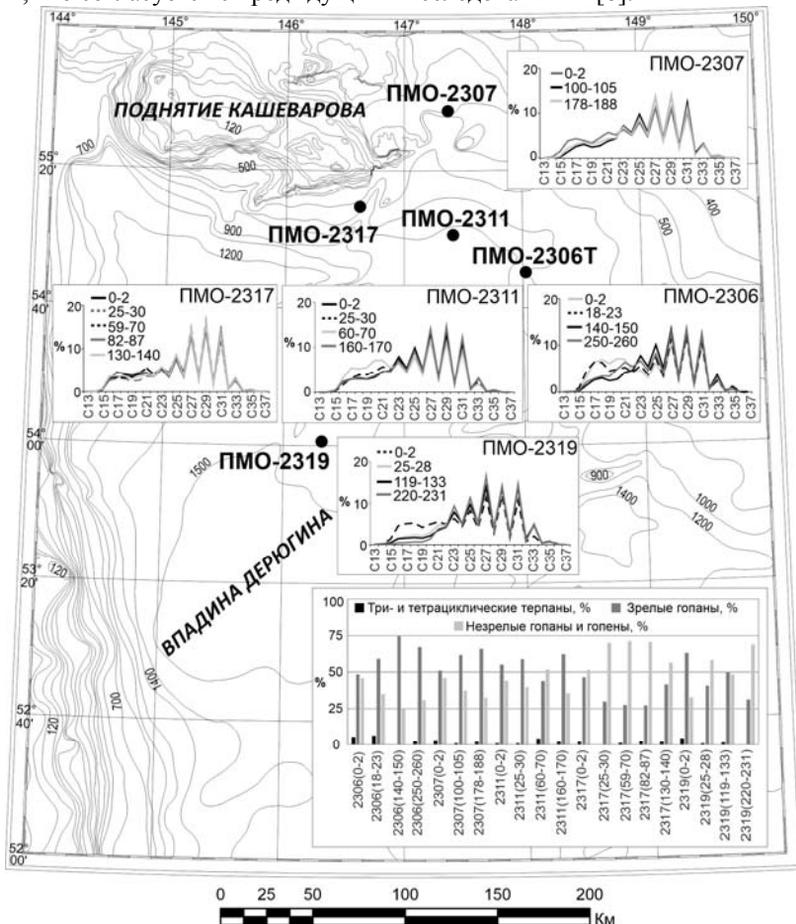
цикл которых основан на симбиозе с хемоавтотрофными эндосимбиотическими бактериями и связан с восстановительными условиями среды верхнего осадочного слоя, вследствие разгрузки сероводородного флюида [3]. Пелиты станции ПМО-2317 характеризуются резким запахом  $H_2S$ , прослоями гидротроилита и наличием обломков моллюсков, что может косвенно указывать на флюидную разгрузку и сопутствующую микробную активность в осадках.

Аналитическая процедура исследования рассеянного органического вещества (РОВ) включала: определение содержания органического ( $C_{орг}$ ) и карбонатного ( $C_{карб}$ ) углерода, извлечение хлороформного ( $A_{хл}$ ) и спирто-бензольного ( $A_{сп-б}$ ) битумоидов, гуминовых кислот (ГК) и остаточного ОВ (ООВ), определение группового состава битумоидов ( $A_{хл}$ ) и молекулярного состава углеводородов (УВ). Фракции алифатических и ароматических УВ выделяли хроматографически и исследовали методом ГХ-МС (Agilent 5973/6850 с квадрупольным масс-селективным детектором) [4].

Содержание  $C_{орг}$  варьирует в узких пределах 0.2÷1.3% в осадке и составляет в среднем 0.9%, что согласуется с ранее полученными данными для илистых отложений Охотского моря [4, 5]. Содержание ГК в пробах колеблется от 6.7 до 35.2% в ОВ, а ООВ изменяется от 61.7 до 90.3% в ОВ (таблица). При этом максимальные концентрации ГК приурочены к верхним слоям осадка, что указывает на поступление свежего вещества терригенного генезиса. Содержание хлороформного битумоида ( $A_{хл}$ ) составляет в среднем 0.02% в осадке, что соответствует фоновым характеристикам поверхностных отложений высокоширотных морей (таблица) [4].

н-Алканы в РОВ осадков представлены гомологическим рядом  $n-C_{15}-n-C_{37}$  и имеют преимущественно бимодальный тип распределения. Уровень зрелости по н-алканам ( $CPI_{122-30} \geq 2.1$ , таблица) не выходит за границы позднего диагенеза. Несмотря на то, что во всех отложениях низкомолекулярные компоненты гидробионтного и/или микробного происхождения имеют подчиненную роль ( $n-C_{15-19}/n-C_{27-31} \leq 0.6$ ,  $TAR \geq 2.8$ ; таблица), их вклад в состав РОВ отдельных горизонтов нельзя недооценивать. Так, поверхностные осадки станции ПМО-2306Б(0–2) см и (18–23) см, а также отдельные прослои станций ПМО-2307Б(0–2), ПМО-2317Т(59–70), ПМО-2317Т(130–140), ПМО-2319Б(0–2) характеризуются максимумами в низкомолекулярном диапазоне  $n-C_{16} - n-C_{19}$ , что указывает на вклад ОВ как микробов, так и гидробионт. В составе н-алканов среднего и высокомолекулярного диапазона в пробах присутствуют компоненты водных макрофитов ( $n-C_{21} - n-C_{23}$ ), мхов ( $n-C_{23} - n-C_{25}$  *Sphagnum sp.*) и высших растений  $n-C_{25+}$  (54% от суммы всех н-алканов, рисунок) [6, 7]. Это согласуется с высоким содержанием в ароматической фракции РОВ фенантрена и алкил-фенантронов, являющихся продуктами трансформации абиетиновой и пимаровой кислот [7]. Эти структуры ассоциированы, как

правило, с минеральной матрицей терригенных пород и характеризуют поставку аллохтонного РОВ в осадки Охотского моря с ледовым разносом и амурским речным стоком и далее транспортируются восточно-сахалинским течением в центральную и восточную часть акватории [7]. При этом значения  $MPII \geq 0.4$  (таблица) свидетельствует о более высоком постдиагенетическом уровне трансформации ароматических компонентов РОВ, что согласуется с предыдущими исследованиями [8].



**Рисунок.** Схема расположения точек пробоотбора в Охотском море. Врезки: содержание компонентов (в %) от суммы n-алканов и терпанов (внизу).

В составе алифатической фракции УВ в РОВ донных отложений были идентифицированы метилированные алканы (3,5, 3,6 и 3,7-диметилалканы,

m/z 99, 113, 127). Предшественниками этих соединений в исходном ОВ с большой степенью вероятности можно считать тетра- и диэфирные липиды архей и бактерий, что указывает на существенную роль микробных источников в формировании пула ОВ акватории [9].

Таблица. Основные параметры углеводородных молекулярных маркеров

№ п/п	Номер станции	Интервал отбора, см	Изопреноиды и n-алканы						Гопаны			Стераны	ПАУ
			Пр/Фит	K <sub>пю</sub>	СРП	ОЕР	ОЕР	TAR	H <sub>29</sub> /H <sub>30</sub>	H <sub>31</sub> /H <sub>30</sub>	H <sub>32</sub> /(S+R)	ΣC <sub>27</sub> /ΣC <sub>29</sub>	МРІ 1
1	ПМО-2306Б	0-2	1.2	0.6	2.9	1.0	5.8	2.8	0.5	0.4	0.7	0.5	0.5
2		18-23	1.5	0.6	2.9	0.9	6.0	3.8	0.6	0.4	0.6	0.7	0.4
3	ПМО-2306Г	140-150	2.1	0.8	2.6	1.0	5.5	8.1	0.6	0.6	0.5	2.0	0.7
4		250-260	2.3	0.8	2.8	0.9	6.2	6.9	0.5	0.6	0.5	0.9	0.6
5	ПМО-2307Б	0-2	2.6	0.9	2.1	0.9	3.8	3.6	0.5	0.5	0.5	0.7	0.4
6	ПМО-2307Г	100-105	2.5	0.9	2.3	1.0	4.3	7.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
7		178-188	2.6	0.9	2.4	0.9	4.9	6.0	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7
8	ПМО-2311-Б	0-2	3.5	1.0	2.6	1.0	5.0	5.9	0.7	0.6	0.5	0.0	0.6
9		25-30	2.9	1.0	2.6	1.0	4.9	5.7	0.6	0.5	0.6	0.7	0.6
10	ПМО-2311Г	60-70	1.7	0.6	2.5	1.0	5.2	2.8	0.4	0.5	0.7	1.6	0.5
11		160-170	2.4	0.9	2.8	0.9	6.3	6.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
12	ПМО-2317Б	0-2	1.8	0.8	3.3	1.0	6.7	5.1	0.6	0.4	0.7	2.5	0.5
13		25-30	1.9	0.8	3.1	1.0	6.0	7.6	0.5	0.5	0.7	0.0	0.5
14	ПМО-2317Г	59-70	1.9	0.7	2.8	0.9	6.1	5.5	0.4	0.5	0.7	1.4	0.4
15		82-87	1.5	0.6	3.3	1.0	6.6	4.8	0.4	0.6	0.7	2.1	0.4
16		130-140	2.0	0.7	3.3	0.9	7.0	7.0	0.5	0.5	0.6	1.9	0.4
17	ПМО-2319Б	0-2	2.3	0.7	2.6	0.9	5.7	3.3	0.6	0.5	0.6	1.0	0.4
18		25-28	2.7	0.7	2.7	0.9	5.7	9.4	0.4	0.7	0.6	0.6	0.5
19	ПМО-2319Г	119-133	2.6	0.7	2.5	0.9	4.6	12.3	0.4	0.8	0.5	0.9	0.6
20		220-231	2.2	0.6	3.0	1.0	6.0	37.2	0.4	1.3	0.4	1.7	0.6

В большей части изученных отложений терпановые УВ в РОВ представлены смесью зрелых компонентов, сорбированных на глинистой минеральной матрице, и незрелых ββ-гопанов и гопенов, маркирующих свежее микробное ОВ (рисунок). В РОВ поверхностных горизонтов колонок ПМО-2306, ПМО-2307, ПМО-2311 и ПМО-2317 повышается содержание незрелых структур. При этом, если в первых двух станциях их содержание закономерно снижается вниз по разрезу, то в осадках ПМО-2311 и 2317, а также 2319 оно, напротив, возрастает. Этот рост согласуется с предположением о разгрузке флюида, которая стимулирует развитие микробных сообществ в погруженных осадочных слоях.

Стераны, являющиеся компонентами ОВ эукариот, представлены в отложениях в основном холестанами и этилхолестанами (ΣC<sub>27</sub>/ΣC<sub>29</sub> 0.5÷2.5, таблица) морского и терригенного генезиса соответственно. При этом их невысокое содержание объясняется, скорее всего, недостаточной степенью зрелости ОВ эукариот и согласуется с наличием в осадках генетических предшественников олеанана – олеан-13(18)-ена и олеан-12-ена, являющихся

молекулярными маркерами высших растений [7].

Таким образом, комплексная оценка геохимических показателей РОВ указывает на существенную роль терригенного ОБ в изученных четвертичных отложениях склонов поднятия Кашеварова – впадины Дерюгина. При этом специфический состав УВ молекулярных маркеров в отдельных образцах, позволяет говорить о процессах микробной активности, связанных с разгрузкой холодных газовых флюидов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов А.С. Позднечетвертичное осадконакопление на шельфе Охотского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 140 с.
2. Seki O., Ikehara M., Kawamura K. et al. Reconstruction of paleoproductivity in the Sea of Okhotsk over the last 30 kyr // *Paleoceanography*. 2004. V. 19. P. 1–18.
3. Greinert J., Bollwerk S.M., Derkachev A. et al. Massive barite deposits and carbonate mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: precipitation process at cold seep sites // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 203. P. 165–180.
4. Morgunova I.P., Petrova V.I., Litvinenko I.V. et al. Hydrocarbon molecular markers in the Holocene bottom sediments of the Barents Sea as indicators of natural and anthropogenic impacts // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. V. 149. P. 1–12.
5. Немировская И.А. Содержание и состав углеводородов в донных осадках сахалинского шельфа // *Геохимия*. 2008. № 4. С. 414–421.
6. Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes // *Organic Geochemistry*. 2000. V. 31. P. 745–749.
7. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The Biomarker Guide: vol. 2 // Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
8. Seki O., Yoshikawa C., Nakatsuka T. et al. Fluxes, source and transport of organic matter in the western Sea of Okhotsk: Stable carbon isotopic ratios of n-alkanes and total organic carbon // *Deep-Sea Research I*. 2006. V. 53. P. 253–270.
9. Каширцев В.А., Дзюба О.С., Никитенко Б.Л. и др. Геохимия высокомолекулярных диметилалканов // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 8. С. 1056–1068.

Detailed study of composition of the dispersed organic matter and hydrocarbon molecular markers in the Pleistocene-Holocene bottom sediments of the Sea of Okhotsk (Kashevarov rise – Derugin’s depression) is performed. The main sources of organic matter, facial conditions of sedimentation and specificity of organic-geochemical background in zone of the cold gas fluid discharge was studied.

**Мосеев Д.С.<sup>1</sup>, Мискевич И.В.<sup>1</sup>, Березина М.О.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

[viking029@yandex.ru](mailto:viking029@yandex.ru), <sup>2</sup>Северный филиал ФГБНУ «ВНИРО», г. Архангельск, e-mail: [berezina@pinro.ru](mailto:berezina@pinro.ru))

## **Микроэлементы в водорослях у берегов южной части острова Вайгач**

**Moseev D.S.<sup>1</sup>, Miskevich I.V.<sup>1</sup>, Berezina M.O.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy Sciences, Moscow, <sup>2</sup>Northern Branch of State Scientific Center of the Russian Federation Federal State Budgetary Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, Arkhangelsk)

## **Trace metals in algae of the coast of the southern part of Vaygach Island**

Ключевые слова: водоросли, загрязнение, микроэлементы, остров Вайгач, пролив Югорский Шар, Баренцево море, Карское море.

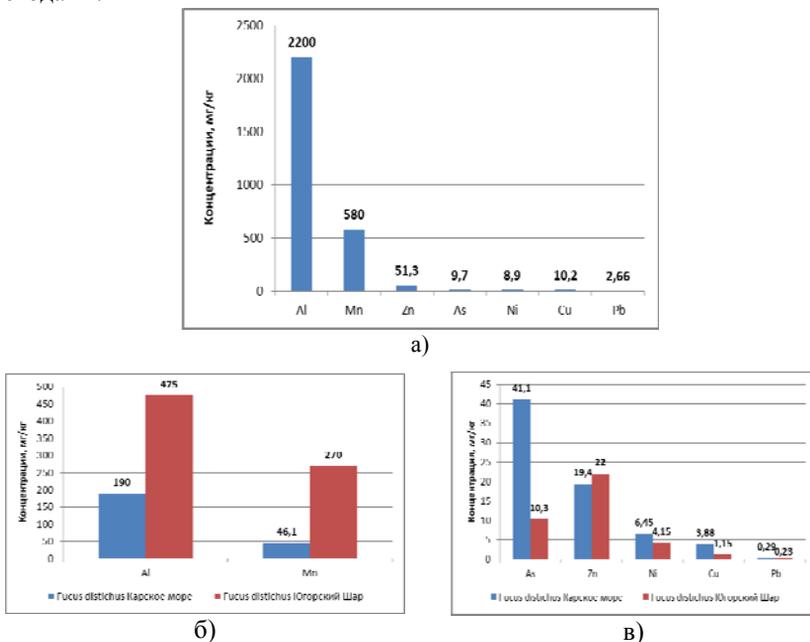
В слоевищах макроводорослей, произрастающих в устьевых частях рек южной части о. Вайгач, исследовано содержание алюминия, марганца, цинка, мышьяка, никеля, меди, свинца. Во всех изученных видах получены высокие концентрации алюминия, марганца, свинца. Высокое содержание металлов в водорослях связано с особенностями геохимической среды острова. Содержание тяжелых металлов в зеленых водорослях *Ulva prolifera* и превышало таковое в бурой водоросли *Fucus distichus*.

Одной из острых экологических проблем является накопление тяжелых металлов в окружающей среде и гидробионтах. В морских биологических объектах часто наблюдается повышенное над фоновыми концентрациями содержание тяжелых металлов [1]. Часто обнаруживается превышение ПДК по мышьяку, ртути, кадмию, свинцу [2]. В водорослях северных морей отмечается повышенное содержание мышьяка, что связывают с влиянием как природного, так и антропогенного загрязнения вод и донных отложений [3–6]. Но скорее всего, основной причиной его накопления в водорослях является биологическая избирательность поглощения [6, 7].

Летом 2023–2024 гг. в целях изучения влияния горнорудных месторождений на экосистемы устьев рек о. Вайгач и прилегающего района Югорского полуострова был проведен отбор проб макроводорослей в устьевых областях рек Красная (впадает в Баренцево море рядом с проливом Югорский Шар), Варкуляха и Никольская (впадают в пролив Югорский Шар), Дровяная и Талейяха (впадают в Карское море).

Определение содержания элементов в водорослях, собранных в устьях рек Красная и Варкуляха, проводилось методом атомно-эмиссионного анализа согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Химический анализ водорослей, собранных в устьях рек Дровяная и Талейяха, осуществлялся

по методике НСАМ 512-МС атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами.



**Рис. 1.** Средние концентрации микроэлементов в водорослях южной части о. Вайгач: а) *Ulva prolifera*, б–в) *Fucus distichus*

Высокие концентрации алюминия 1200 мг/кг и марганца – 580 мг/кг установлены для зеленой водоросли *Ulva prolifera* (рис. 1б). Этот вид встречался локально в устьях рек Красная и Варкульяха на илисто-песчаные приливных осушках, образуя небольшие по площади фитоценозы.

В устье р. Красная расположена горнорудная шахта, стоки от которой поступают в реку, с чем и могут быть связаны высокие концентрации микроэлементов в окружающей среде. Более высокие концентрации для всех металлов кроме марганца получены в устье р. Никольская в водоросли *Ulva prolifera* [8], что, скорее всего, связано с геохимическими особенностями пород Югорского полуострова.

В талломах бурой водоросли *Fucus distichus* концентрации большинства микроэлементов оказались ниже, чем в исследованных видах зеленых водорослей (рис. 1а). Это указывает на более низкую поглотительную способность *Fucus distichus*, что возможно обусловлено более сложной морфолого-анатомической организацией таллома этого вида в отличие от *U. prolifera*, имеющего трубчатый однослойный таллом и зеленой водоросли – однорядного нитчатого строения. Тем не менее, в слоевищах *Fucus distichus*

из приустьевой части Карского моря рядом с реками Дровяная и Талейяха также была зарегистрирована аномально высокая концентрация мышьяка, в среднем – 41.1 мг/кг, что почти в 2 раза превысило ПДК в сухом весе водоросли (5 мг/кг).

Среднее содержание мышьяка, никеля и меди в *Fucus distichus* из приустьевой акватории рек Карского моря оказалось выше, чем в лагунах рек Варкуляха и Красная, впадающих в пролив Югорский Шар на юго-западе острова (рис. 1в). Напротив, концентрации алюминия и марганца в устьях рек пролива Югорский Шар существенно выше, чем в Карском море. Немногим выше оказалась средняя концентрация цинка и почти не изменяется по свинцу (рис. 1с), что связано с их высокими концентрациями в устье р. Красная: цинк – 50 мг/кг, свинец – 2.4 мг/кг.

Меньшее содержание элементов, кроме мышьяка в этих устьях обнаружено в *Fucus distichus*. Это, связано с задержкой накопления металлов в вершинах устьев, что обусловлено морфологией устьев, илистыми донными отложениями и значительным поглощением зеленой водорослью [9].

Проблема накопления микроэлементов макроводорослями остается открытым вопросом современной науки. Несомненно, важнейшими факторами аккумуляции водорослями являются содержание микроэлементов в окружающей среде и разная способность водорослей к их поглощению.

В макроводорослях устьев рек о. Вайгач наиболее высокие концентрации получены для алюминия, марганца, мышьяка, цинка и свинца. Скорее всего, основным источником поступления цинка и свинца в окружающую среду на о. Вайгач являются горнорудные месторождения, о чем свидетельствуют высокие концентрации этих металлов в водорослях устья р. Красная. Здесь же наблюдалось превышение ПДК по содержанию свинца в слоевищах *Ulva prolifera* [8]. Высокие концентрации алюминия и марганца, также связаны с состоянием геохимической среды на острове. Высокие концентрации этих элементов в зеленых водорослях, обусловлены не только их содержанием в окружающей среде, но и адсорбционной избирательностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленикина О.А., Капков В.И. К вопросу о фоновых уровнях тяжелых металлов в агарифитах Черного моря // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2008. № 2. С. 40–44.
2. Донец М.М., Цыганков М.Ю. Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России // Вестник ДВО РАН. 2019. № 4. С. 90–103.
3. Воскобойников Г.М., Никулина А.Л., Салахов Д.О., Шахвердов В.А. Содержание тяжелых металлов в бурой водоросли *Sacharina latissima*

Баренцева и Гренландского морей // Наука юга России. 2019. Т. 15. № 2. С. 39–44.

4. Халиков И.С., Савин Ю.И. Мышьяк и морская среда // Экологическая химия. 2010. Т. 19. Вып. 3. С. 172–190.

5. Langston W.J. Availability of arsenic to estuarine and marine organisms // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1984. V. 80. P. 143–154.

6. Stoeppler M., Burow M., Backhaus F. et al. Arsenic in seawater and brown algae of the Baltic and North Sea // Mar. Chem. 1986. V. 18. P. 321–334.

7. Игнатова Т.А., Подкорытова А.В., Березина М.О. Красная водоросль *Palmaria palmata*: биологическая и химико-технологическая характеристика, рекомендации по ее использованию как источника нутриентов в питании человека // Индустрия питания. 2023. Т. 8. № 3. С. 134–151.

8. Miskevich I.V., Lokhov A.S., Moseev D.S., Kotova E.I. Polymetallic Ore Mining Impact Assessment on the Benthic Hydrobiocenosis of the Small Estuaries on the Arctic Islands // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. V. 12. № 9. 1570.

9. Мискевич И.В., Котова Е.И., Мосеев Д.С. Оценка опасности накопления тяжелых металлов в устьевых экосистемах при добыче полиметаллических руд на Арктических островах // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 12. С. 60–64.

The thalli of macroalgae growing in the estuaries of rivers in the southern part of Vaygach Island were analyzed for aluminum, manganese, zinc, arsenic, nickel, copper, and lead. High concentrations of aluminum, manganese, and lead were found in all studied species. The high metal content in the algae is related to the island's geochemical environment. Heavy metal levels in the green alga *Ulva prolifera* exceeded those in the brown alga *Fucus distichus*.

**Мошаров С.А.<sup>1,2</sup>, Боровкова К.А.<sup>3</sup>, Сашова О.А.<sup>4</sup>,  
Корсак М.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; e-mail: [sampost@list.ru](mailto:sampost@list.ru);

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана, г.

Москва; <sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград;

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва.)

**Продукционная активность фитопланктона в шельфово-  
склоновой зоне моря Лаптевых в летний период**

**Mosharov S.A.<sup>1,2</sup>, Borovkova K.A.<sup>3</sup>, Sashova O.A.<sup>4</sup>,  
Korsak M.N.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; <sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical  
University, Moscow; <sup>3</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad;

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow)

**Production activity of phytoplankton in the shelf-slope zone of  
the Laptev Sea in summer**

Ключевые слова: первичная продукция, концентрация хлорофилла «а»,  
фотосинтетическая эффективность фотосинтеза фитопланктона, море Лаптевых

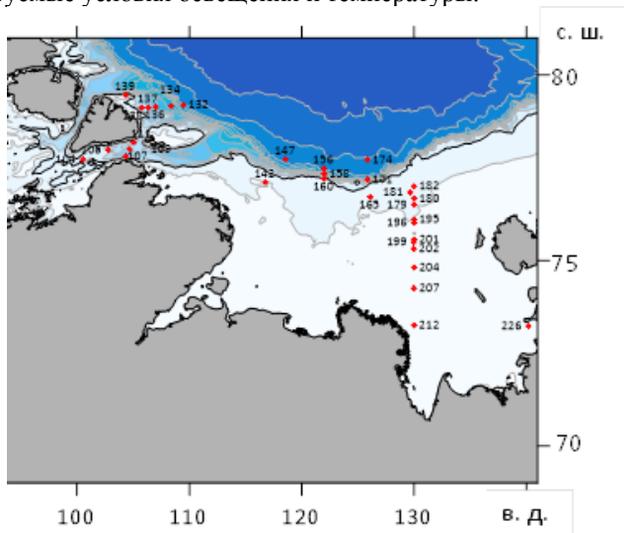
В районе внешней границы шельфа в юго-западной и южной части моря Лаптевых изучалось распределение параметров первичной продуктивности фитопланктона в летний период (август 2024 г.). Шельфово-склоновый район характеризуется выраженным влиянием вдольсклонового течения и стока реки Лена, что определяет изменчивость условий формирования первичной продукции.

В данной работе анализируется изменчивость продукционных характеристик фитопланктона на границе шельфа и склона в зоне влияния стока реки Лены и вне зоны влияния речного стока у берегов Северной Земли (рисунок). Измерения были выполнены в ходе экспедиции НИС «Профессор Молчанов» по программе «Плавучий университет» МФТИ-ИО РАН в море Лаптевых в период с 7 по 23 августа 2024 г.

Пробы воды отбирали с помощью пластиковых батометров Нискина на 23 станциях с поверхностного горизонта. Концентрацию хлорофилла *a* в воде измеряли методом флуоресценции ацетонового экстракта [1]. Концентрация хлорофилла *a* была рассчитана согласно [2]. Активную флуоресценцию хлорофилла *a* измеряли с помощью флуориметра WATER-РАМ-II (Walz, Германия) [3].

Параметры активной флуоресценции характеризуют разные стадии светового этапа фотосинтеза, на котором происходит улавливание световой энергии и ее передача для синтеза органического вещества. Проводилось определение таких параметров, как квантовая эффективность фотосинтеза ( $F_v/F_m$ ) и скорость электронного транспорта ( $rETR$ ) в фотосистеме 2 фитопланктона. Величина  $F_v/F_m$  отражает потенциальную

фотосинтетическую способность фитопланктона, а величина  $rETR$  позволяет оценить реальную продукционную способность в единицах потока энергии в фотосистеме при текущем уровне освещения. Скорость первичной продукции определялась радиоуглеродным методом с помощью оригинального инкубатора со светодиодной подсветкой, обеспечивающего контролируемые условия освещения и температуры.



**Рисунок.** Схема расположения станций в море Лаптевых.

Эффективность фотосинтеза, отражающая степень использования световой энергии, улавливаемой в процессах синтеза органических веществ, может быть выражена через соотношение значений АЧ и  $rETR$  ( $AN/rETR$ , фотосинтетическая эффективность). Эта величина характеризует долю усвоенной фитопланктоном световой энергии, использованной для синтеза органического вещества на темновой стадии фотосинтеза, т.е. эффективность использования энергии в конкретном случае.

Первичная продуктивность в конкретной точке моря зависит от концентрации хлорофилла «а», уровня освещенности и активности фотосинтетического аппарата, что связано, прежде всего, с эффективностью поглощения света пигментами и превращением его в химически связанную энергию. Эта энергия используется для синтеза органических веществ в результате фотосинтеза.

Был выполнен анализ распределения величин первичной продуктивности фитопланктона на двух разрезах через шельфово-склоновую зону перпендикулярно краю шельфа: восточнее Северной Земли (станции 132–138) и на траверзе устья р. Лены (станции 165–212).

Склоновые станции на обоих разрезах (станции 132, 171 и 174) располагались в районе с глубинами более 800 м. Остальные станции находились над глубинами 50–370 м на североземельском разрезе и 16–60 м на ленском разрезе. При этом в первом случае зона мелководного шельфа (до 50 м глубиной) была незначительной по площади, а резкий свал глубин был за границей обширной зоны с глубинами 50–350 м. На ленском разрезе резкий свал глубин был за внешней границей очень обширного шельфового района (с глубинами до 60 м).

Концентрация хлорофилла *a* на североземельском разрезе варьировала от 0.20 до 0.50 мг/л (в среднем 0.32 мг/л), при этом максимум наблюдался в средней части разреза над глубиной 350 м. На ленском разрезе, расположенном в основном на шельфе, концентрация хлорофилла *a* варьировала от 0.15 до 1.04 мг/л (в среднем 0.43 мг/л). Пространственное распределение хлорофилла на этом разрезе характеризовалось снижением почти в два раза на краю шельфа по сравнению с глубоководной зоной и значительный тренд на увеличение значений от края шельфа до приустьевой зоны (увеличение в 7 раз). Скорость первичной продукции фитопланктона на североземельском разрезе в глубоководной части была незначительной (1.0–3.5 мгС/м<sup>2</sup> в сут), но существенно возрастала в более мелководном районе (11.3–14.9 мгС/м<sup>2</sup> в сут). На ленском разрезе скорость первичной продукции варьировала от 2.2 мгС/м<sup>2</sup> в сут в районе края шельфа до 40.7 мгС/м<sup>2</sup> в сут вблизи устья р. Лены. Характер изменчивости фотосинтетической эффективности фитопланктона в шельфово-склоновых зонах на данных разрезах заметно различался. На североземельском разрезе значения AN/rETR значительно увеличивались в районе обширной зоны с глубинами около 300 м (0.060–0.080) и снижались в глубоководной и мелководной зонах (0.040–0.045). На всем протяжении ленского разреза значения этой величины варьировали от 0.013 до 0.052 при отсутствии выраженного тренда.

Анализ полученных данных по параметрам первичной продуктивности показывает, что на североземельском разрезе изменение скорости первичной продукции определялось в большей степени величиной фотосинтетической эффективности фитопланктона и в меньшей степени – концентрацией хлорофилла *a* (табл.). По-видимому, это связано с особенностями гидрологической структуры в этом районе, обусловленной вдольсклоновым течением атлантических вод, проникающих с севера в море Лаптевых. При этом в районе резкого свала глубин может формироваться выраженный термохалинный градиент, обуславливающий, как было показано ранее, увеличение фотосинтетической эффективности [4].

С другой стороны, на ленском разрезе при существенном влиянии речного стока первичная продуктивность определялась в основном концентрацией хлорофилла «а» и в меньшей степени фотосинтетической

эффективностью. Подобная ситуация с различной ролью величин фотосинтетической эффективности и концентрации хлорофилла в первичной продуктивности фитопланктона в зоне влияния речного стока и в зоне гидрологического фронта на морской акватории была продемонстрирована нами в Балтийском море (Финский залив и юго-восточная часть Балтийского моря соответственно) [5]

Таблица. Коэффициенты корреляции Спирмена между скоростью первичной продукции (PP) и величинами фотосинтетической эффективности (AN/rETR) и концентрации хлорофилла *a* (Chl) на двух шельфово-склоновых разрезах в море Лаптевых.

Разрез	PP и AN/rETR	PP и Chl
Североземельский (станции 132–138)	0.83	0.68
Ленский (станции 165–212)	0.63	0.96

Работа выполнена в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2024-117) и при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема Госзадания FMWE-2024-2021).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study Protocols), Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS) Core Measurements. UNESCO, 1994. P. 119–122.
2. HolmHansen O., Riemann B. Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. P. 438–447.
3. Krause G.H., Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics // *Annual review of plant biology*. 1991. V. 42. № 1. P. 313–349.
4. Mosharov S.A., Sergeeva V.M., Kremenetskiy V.V. et al. Assessment of phytoplankton photosynthetic efficiency based on measurement of fluorescence parameters and radiocarbon uptake in the Kara Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019. V. 218. P. 59–69.
5. Mosharov S., Mosharova I., Borovkova K., Bubnova E. Variability of Primary Productivity as an Initial Link in Carbon Flux Under the Influence of Hydrological Conditions in the Baltic Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. V. 24 (2).

In the area of the outer boundary of the shelf in the southwestern and southern parts of the Laptev Sea, the distribution of the parameters of primary productivity of phytoplankton in the summer period (August 2024) was studied. The shelf-slope area is characterized by a pronounced influence of the along-slope current and runoff of the Lena River, which determines the variability of the conditions for the formation of primary production.

**Пипко И.И., Пугач С.П., Андреев А.Г., Мотора А.П.,  
Дударев О.В.**

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
г. Владивосток; e-mail: irina@poi.dvo.ru)

**Параметры карбонатной системы и потоки CO<sub>2</sub> между  
водой и атмосферой на западном шельфе Чукотского моря  
перед началом ледостава**

**Pipko I.I., Pugach S.P., Andreev A.G., Matora A.P.,  
Dudarev O.V.**

(V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok)

**Carbonate system parameters and air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the  
western Chukchi Sea shelf shortly before sea ice formation**

Ключевые слова: потоки CO<sub>2</sub>, карбонатная система, асидификация, мезомасштабная динамика вод, Чукотское море

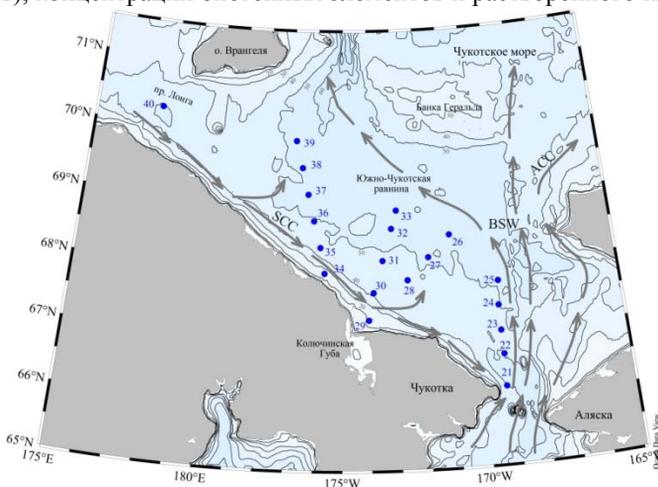
Изучены основные факторы, влияющие на динамику карбонатной системы и потоков CO<sub>2</sub> между водой и атмосферой на западном шельфе Чукотского моря перед началом ледостава. Обнаружено, что акватория шельфа была стоком для атмосферного CO<sub>2</sub> со средней и максимальной скоростями поглощения 7.1 ммоль·м<sup>-2</sup>·сутки<sup>-1</sup> и 23.5 ммоль·м<sup>-2</sup>·сутки<sup>-1</sup> соответственно. Карбонатная химия и потоки CO<sub>2</sub> в значительной степени контролировались атмосферной циркуляцией, динамикой вод и связанными с ней биологическими процессами; температурный фактор играл второстепенную роль.

Высокопродуктивное Чукотское море является эффективным поглотителем атмосферного CO<sub>2</sub>. Суммарный сток CO<sub>2</sub> в морскую воду в безледный сезон по минимальным оценкам может составлять 13 × Tg C [1]. По другим оценкам сезонный (с мая по сентябрь) и годовой потоки CO<sub>2</sub> из атмосферы на шельфе Чукотского моря составляют ~27 ± 7 Tg C год<sup>-1</sup> и 38 ± 7 Tg C год<sup>-1</sup> соответственно [2], что позволяет рассматривать шельф Чукотского моря как один из крупнейших стоков атмосферного CO<sub>2</sub> среди арктических морей.

Целью представленной работы было выявление основных факторов, влияющих на величину и изменчивость потоков CO<sub>2</sub> в западной части Чукотского моря перед началом образования льда и оценка влияния гидрометеорологических характеристик на пространственное распределение карбонатных параметров вод в этот малоизученный сезон.

Исследование было выполнено на акватории западного шельфа Чукотского моря в октябре 2023 г. (рис. 1). Величина pH измерялась потенциометрически с использованием ячейки безжидкостного соединения [3], общая щелочность определялась методом, предложенным в [4]. Синхронно определялись гидрологические параметры (температура,

соленость), концентрации биогенных элементов и растворенного кислорода.

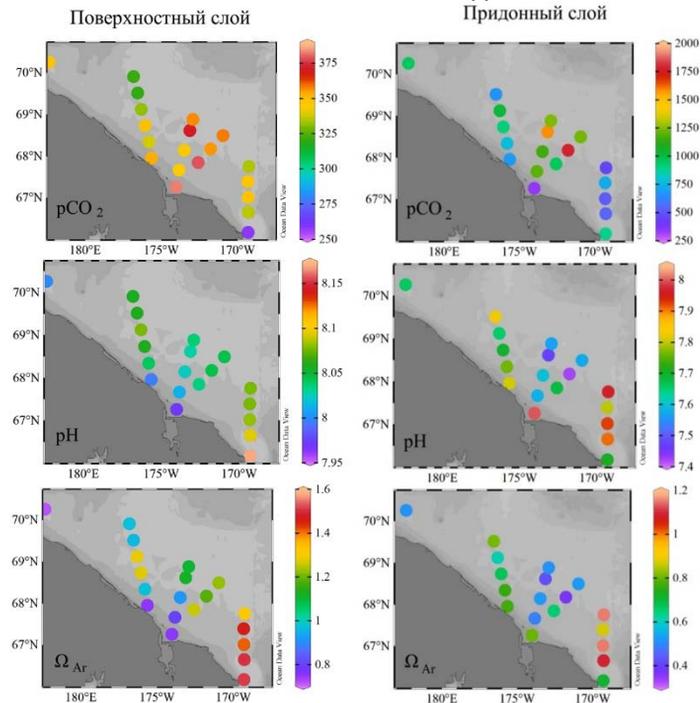


**Рис. 1.** Положение океанографических станций на шельфе Чукотского моря, НИС «Академик Опарин», октябрь 2023 г. Стрелками показана схема течений: SCC – Сибирское прибрежное течение, ACC – Аляскинское прибрежное течение, BSW – воды Берингова моря.

Распределение параметров карбонатной системы в водной толще характеризовалось значительной изменчивостью (рис. 2). При этом величины парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) в поверхностном слое были ниже атмосферных, а воды, за исключением узкой прибрежной зоны, были пересыщены карбонатом кальция. Противоположная картина наблюдалась в придонном слое – воды здесь были, главным образом, коррозионными по отношению карбонату кальция и многократно пересыщены  $\text{CO}_2$  (рис. 2).

Шельф Чукотского моря является гидродинамически высокоактивной зоной, где на небольшой по площади акватории смешиваются воды различного генезиса, взаимодействуют струйные течения и в большом количестве формируются разномасштабные гидрологические неоднородности, что подтверждено многими исследованиями [5–9 и приведенные в них ссылки]. Установлено, что основную роль в формировании пространственного распределения карбонатных характеристик в позднесенний сезон играли неоднородности гидрологической структуры вод, а температурный фактор был малозначим. Анализ полей геострофических течений и аномалий уровня моря позволил идентифицировать на акватории шельфа ряд разномасштабных циклонических и антициклонических круговоротов, а также Сибирское прибрежное течение. Эти области характеризовались аномальным распределением параметров карбонатной системы: так, на основе последних

была идентифицирована зона квазистационарного циклонического круговорота, существовавшего ранее на акватории юго-западной части моря. Во время работ в результате смены атмосферной циркуляции в поверхностном слое циклонический круговорот уже не определялся, но в придонном слое сохранились его «отпечатки» – экстремально высокие величины  $pCO_2$ , максимальные концентрации биогенных элементов, минимальное насыщение вод кислородом и арагонитом. Обнаруженные антициклонические круговороты, напротив, обуславливали вентиляцию придонных вод и снижение их кислотности и коррозионности.



**Рис. 2.** Распределение карбонатных параметров (парциального давления  $CO_2$  ( $pCO_2$ ), атм; pH, ед. pH; степени насыщения вод арагонитом,  $\Omega_{Ar}$ ) в поверхностном и придонном слоях.

Были определены параметры карбонатной системы вод Сибирского прибрежного течения в изучаемый сезон и было показано, что по сравнению с водами шельфа оно приносило в Чукотское море более кислые и коррозионные воды, обладающие меньшей буферной емкостью по отношению к атмосферному  $CO_2$  (рис. 2).

Совместный анализ карбонатных и гидрологических характеристик

позволил выявить источники распределения поверхностных вод в различных районах западного шельфа Чукотского моря. Показано, что основной причиной распределения вод севернее Берингова пролива было присутствие высокощелочных вод североамериканских рек, на западе района – высоких концентраций талых вод, а также, в меньшей степени, вод сибирских рек. Показана возможность и эффективность использования карбонатных характеристик не только для дифференцирования вклада талых и материковых вод, но и для идентификации речных вод различного генезиса.

В исследуемый сезон морские воды были стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ , поглощая его со средней скоростью  $7.92 \pm 6.14$  ммоль  $\text{м}^2$  сутки<sup>-1</sup> при максимальных величинах абсорбции  $23.5$  ммоль  $\text{м}^2$  сутки<sup>-1</sup>. Уровень недосыщения поверхностных вод  $\text{CO}_2$  был снижен по сравнению с летне-осенним сезоном [1–2, 10–12]. Установлено, что при общей характеристике акватории Чукотского моря как стока для атмосферного  $\text{CO}_2$ , интенсивность обменных процессов была очень мозаична, что определялось, в первую очередь, высокой изменчивостью скорости ветра. Разница величин  $p\text{CO}_2$  между водой и атмосферой определяла направление потоков  $\text{CO}_2$  и лишь незначительно влияла на их величину.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-17-00075).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пипко И.И., Пугач С.П., Репина И.А. и др. Распределение и потоки углекислого газа на шельфе Чукотского моря // Исследование Земли из Космоса. 2015. № 3. С. 43–59.
2. Bates N.R. Air-sea  $\text{CO}_2$  fluxes and the continental shelf pump of carbon in the Chukchi Sea adjacent to the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № C10013. doi:10.1029/2005JC003083.
3. Тищенко П.Я., Вонг Чи.Ши., Павлова Г.Ю. и др. Измерение pH морской воды с помощью ячейки безжидкостного соединения // Океанология. 2001. Т. 41. № 6. С. 849–859.
4. Бруевич С.В., Деменченков С.К. Инструкция по производству химических исследований морской воды. М.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 83 с.
5. Коучмен Л.К., Огорд К., Трипп Р.Б. Берингов пролив: региональная физическая океанография. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 201 с.
6. Weingartner T.J., Danielson S., Sasaki Y. et al. The Siberian Coastal Current: A wind- and buoyancy-forced Arctic coastal current // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 29697–29713.
7. Pisareva M.N., Pickart R.S., Spall M.A. et al. Flow of pacific water in the western Chukchi Sea: results from the 2009 RUSALCA expedition // Deep Res. Part I. 2015. V. 105. P. 53–73.

8. Kubryakov A.A., Kozlov I.E., Manucharyan G.E. Large mesoscale eddies in the Western Arctic Ocean from satellite altimetry measurements // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2021. V. 126. e2020JC016670.
9. Clement Kinney J., Assmann K.M., Maslowski W. et al. On the circulation, water mass distribution, and nutrient concentrations of the western Chukchi Sea // *Ocean Sci*. 2022. V. 18. P. 29–49.
10. Pipko I.I., Semiletov I.P., Tishchenko P.Ya. et al. Carbonate chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea // *Prog. Oceanogr*. 2002. V. 55. № 1–2. P. 77–94.
11. Mathis J.T., Bates N.R., Hansell D.A., Babilia T. Net community production in the northeast Chukchi Sea // *Deep-Sea Res. Pt. II*. 2009. V. 56. P. 1213–1222.
12. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I., Shakhova N.E. Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic // *Journal of Marine System*. 2007. V. 66. P. 204–226.

This study examined the main drivers of carbonate system and air-sea CO<sub>2</sub> flux dynamics in the western Chukchi Sea shelf shortly before sea ice formation. Our findings revealed a moderate atmospheric CO<sub>2</sub> sink over the western Chukchi Sea shelf: the mean CO<sub>2</sub> flux was 7.1 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> with maximal absorption rate 23.5 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>. Carbonate chemistry and CO<sub>2</sub> air-sea fluxes were strongly controlled by the atmospheric forces, water dynamics and related biological processes; the temperature factor played a secondary role.

**Поливанова Т.К.<sup>1</sup>, Гершелис Е.В.<sup>1</sup>, Якушев Е.В.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Научно-технологический университет «Сириус», ФТ Сириус, e-mail: [bari.polivanova@gmail.com](mailto:bari.polivanova@gmail.com); <sup>2</sup>Норвежский институт водных исследований (NIVA), г. Осло, e-mail: [evgeniy.yakushev@niva.no](mailto:evgeniy.yakushev@niva.no))

**Влияние стока малой реки на геохимию осадков в прибрежной зоне на примере р. Ашамба (Кавказское побережье Черного моря)**

**Polyvanova T.K.<sup>1</sup>, Gershelis E.V.<sup>1</sup>, Yakushev E.V.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Sirius University of science and technology, Sirius; <sup>2</sup>Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo)

**The impact of small river runoff on the geochemistry of sediments in the coastal zone on the example of the Asheamba River (Caucasian coast of the Black Sea)**

Ключевые слова: малые реки, донные осадки, поровые воды, биогенные элементы, гипоксия, Черное море.

Исследовано влияние стока малой реки Ашамба на геохимию донных осадков в Голубой бухте (Черное море). Установлено формирование связанных с речным выносом локальных илистых отложений («муляки») с ярковыраенными восстановительными условиями и экстремально высокими концентрациями биогенных элементов в поровых водах.

Северо-восточное побережье Черного моря подвержено чрезвычайно высокой антропогенной нагрузке и значительному влиянию материкового стока многочисленных малых рек [1, 2]. Внутригодовое распределение атмосферных осадков, в частности, частота, интенсивность и продолжительность экстремальных осадков, существенно влияют на поступление взвешенных веществ с речным стоком в море. На черноморском побережье России в последние 50 лет наблюдается устойчивый тренд к повышению температуры воздуха и повышению годового объема осадков, следствием чего становятся климатические изменения режимов стока малых рек региона [3]. В результате этих климатических изменений повышается роль экстремальных паводков как в поступлении пресной воды, биогенов, терригенной взвеси и антропогенных загрязнений с суши в море, так и в их последующем переносе в прибрежной зоне моря. Данные факторы оказывают определяющее влияние на формирование пространственно-временных особенностей распределения в воде гидрохимических параметров, интенсивности материкового стока и особенностям процессов осадконакопления в шельфовой зоне [4, 5].

В районе устьев малых рек Черного моря на Кавказском побережье формируются локальные участки дна с выраженными восстановительными условиями. Это связано с поступлением большого количества

органического вещества (ОВ) с речным стоком, который становится субстратом для аэробного, а затем анаэробного микробного разложения [6]. Ограниченный водообмен в бухтах из-за особенностей гидродинамики приводит к формированию застойных зон с развитием анаэробных процессов.

Исследователи ИО РАН, исследовавшие донные осадки в Голубой бухте применяли термин "муляка" для обозначения специфических осадков, связанных с выносом реки Ашамбы [7–13]. "Мулякой" на Кубани, называют грязь, ил [14]. На наш взгляд этот термин может быть применен к зонам дна у речных устьев с донными осадками, обогащенными органическим веществом, приносимом реками. Площадь таких участков и их встречаемость на северо-восточном побережье Черного моря неизвестна, но они негативно влияют на донную экосистему.

Целью данной работы являлась комплексная оценка влияния стока малой реки Ашамба на процессы раннего диагенеза в донных осадках и формирование гипоксических условий в придонном слое вод Голубой бухты (Черное море). Для ее достижения проведено сравнительное изучение гидрохимических и геохимических параметров в зоне аккумуляции речного материала («муляке») и на фоновых участках.



**Рисунок.** Схема расположения станций.

Исследования были проведены в Голубой бухте, расположенной в северо-восточной части Черного моря в июне 2025 г. на базе Южного

отделения Института океанологии (рисунок). Отбор проб поровой воды и осадка был выполнен в трех точках с тремя повторностями. Первая (станции 1–3) и вторая (станции 4–6) точка в 300 м от пирса в районе черного органического ила («муляки»), где было отобрано шесть кернов с осадком с глубины 11.5 м. Третья точка (станции 7–9) располагалась в районе пирса (фон), где было отобрано три пробы осадка на глубине 6 м. Отбор проб морской воды был выполнен в точках 1 и 3 для получения вертикального профиля распределения биогенных элементов с применением 5-литрового батометра Нискина. Гидрофизические измерения проводились с помощью CTD-зонда YSI CastAway. Отбор проб осадка осуществлялся с борта моторной лодки с помощью водолаза, который погружался и отбирал осадок при помощи пластиковых трубок. Трубка предварительно была перфорирована отверстиями диаметром 4 мм, расстояние между которыми составило 1.5 см. В отверстия вставлялись фильтры Rhizon 0.45 мкм для отбора поровой воды.

Проведенные исследования выявили значимые различия в геохимической структуре поровых вод донных осадков между зоной муляки и фоновыми участками. Анализ вертикальных профилей показал, что в поровых водах осадков муляки формируются исключительно восстановительные условия, при этом окислительно-восстановительный потенциал (Eh) закономерно снижается с глубиной, достигая экстремально низких значений от –250 до –376 мВ на различных станциях. В этих условиях наблюдалось интенсивное накопление продуктов анаэробной дегградации органического вещества: концентрации аммония ( $\text{NH}_4$ ) монотонно возрастали с глубиной, достигая максимума 2240 мкМ, что на три порядка превышает фоновые значения (менее 8 мкМ). Распределение фосфатов ( $\text{PO}_4$ ) было более меняющимся: на большинстве станций отмечались выраженные максимумы в интервале 4.5–10 см (до 73 мкМ). Концентрации растворенного двухвалентного железа ( $\text{Fe}^{2+}$ ) демонстрировали сложную пространственную неоднородность – от плавного увеличения с глубиной до ярко выраженных пиков в поверхностном слое (800 мкМ на станции 4), отражая динамику восстановительных процессов и возможное осаждение сульфидов. Распределение марганца ( $\text{Mn}^{2+}$ ) также варьировало: на большинстве профилей наблюдалось его постепенное накопление с глубиной (до 132 мкМ), однако на станции 6 зафиксирован необычный поверхностный максимум (74 мкМ), что может указывать на диффузию из нижележащих горизонтов. На станциях 2, 4 и 5 обнаружены значительные содержания метана ( $\text{CH}_4$ ) — до 272 мкМ, 458 мкМ и 2062 мкМ соответственно, при этом глубины максимальных концентраций различались, свидетельствуя о пространственном разобщении зон метаногенеза и сульфатредукции. На фоновых станциях геохимические профили были единообразными и показали слабовосстановительные условия (Eh не ниже –120 мВ) с

незначительным накоплением биогенных элементов.

Воздействие речного стока не ограничилось донными осадками и ярко проявилось в придонном слое воды. Непосредственно у дна над зоной муляки сформировался выраженный придонный пограничный слой толщиной 1.5–2 м, где были обнаружены однозначные маркеры развития аноксии: присутствие сероводорода ( $H_2S$ ) в концентрации 2.4 мкМ и накопление аммония (1.70 мкМ). При этом вертикальное распределение биогенных элементов в водной толще имело сложный нелинейный характер: практически полное отсутствие нитратов ( $NO_3$ ) контрастировало с их наличием в поверхностном слое фоновой станции, а фосфаты достигали максимума на глубине 2 м. Физические параметры также отражали уникальность этой зоны: температурный градиент был более выражен (разница почти  $2^\circ C$  между поверхностью и дном против  $0.7^\circ C$  на фоновой станции), а соленость увеличивалась с глубиной более заметно (от 17.81 до 17.87 PSU), создавая условия для устойчивой стратификации в период наблюдений. На фоновой же точке вся водная толща сохраняла окислительный характер на всех глубинах с плавными вертикальными градиентами параметров без признаков восстановительных процессов. Полученные данные демонстрируют, что сток малой реки приводит к формированию очагов интенсивного восстановительного диагенеза в донных осадках и оказывает негативное воздействие на экологическое состояние придонных вод, создавая условия для развития локальных гипоксических зон.

Авторы признательны коллегам из НТУ «Сириус», сотрудникам ИО РАН Ребецкой Е.А., Ребецкому Н.М., Часовникову В.К., студентам кафедры океанологии МГУ и их руководителю Гангнусу И.А., Мальгинову В.В. из дайвинг-клуба «Другой мир», и всем кто помогал в проведении исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-17-20030. <https://rscf.ru/project/24-17-20030/>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Часовников В.К., Очередник О.А. Мониторинг загрязнения прибрежной зоны Черного моря // Экология гидросферы. 2023. № 1 (9). С. 46–56.
2. Чижова Ю.Н., Добролюбов С.А., Буданцева Н.А. и др. Оценка влияния вод малых рек на приповерхностные воды Черного моря по изотопным данным // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. № 6. С. 54–59.
3. Osadchiev A.A., Korotenko K.A., Zavialov P.O. et al. Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: case study of the Peinan River, Taiwan // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2016. V. 16. № 5. P. 1289–1299.

4. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н. Речные плюмы в акватории Сочи // Наука в России. 2014. № 2. С. 4–12.
5. Гуров К.И., Гурова Ю.С., Орехова Н.А. Физико-химические характеристики придонных, поровых вод и донных отложений шельфа северо-восточной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39. № 4 (232). С. 497–511.
6. Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В. Геохимия и радиоэкология вод и донных отложений р. Мзымты Черноморского побережья // Геохимия. 2022. Т. 67. № 4. С. 376–393.
7. Вершинин А.В., Горницкий А.Б., Егоров А.В., Розанов А.Г. Методика изучения химического обмена через границу вода-осадок в открытой системе морского дна // Океанология. 1994. Т. 34. № 1. С. 139–145.
8. Розанов А.Г., Егоров А.В., Вершинин А.В. Лендер ИО РАН – донная станция для изучения химического обмена на дне моря // Океанология. 2006. Т. 46. № 4. С. 612–620.
9. Yakushev E.V. et al. The northeastern Black Sea redox zone: hydrochemical structure and its temporal variability // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. V. 53. № 17–19. P. 1769–1786.
10. Пахомова С.В., Кононец М.Ю., Юдин М.В., Розанов А.Г. Исследование потоков растворенных форм железа и марганца через границу раздела вода-дно на северо-восточном шельфе Черного моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 4. С. 524–528.
11. Розанов А.Г., Вершинин А.В., Егоров А.В. Исследование химического обмена на границе вода-дно в Голубой бухте Черного моря // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 3. С. 341–350.
12. Вершинин А.В., Розанов А.Г. Химический обмен на границе вода-дно на шельфе Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 170–182.
13. Пахомова С.В. Растворенные формы железа и марганца в морской воде, осадках и на границе вода-дно: дис. ... канд. геогр. наук. М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2005. 199 с.
14. Флягина М.В. Народные географические термины в составе диалектных фразеологизмов (на материале донских говоров) // Лексический атлас русских народных говоров (Материалы и исследования). СПб., 2014. С. 640–646.

The study assessed the impact of the small Asheamba River on sediment geochemistry in the Blue Bay (Black Sea). The river runoff forms localized silty deposits (“mulyaka”) with strong reducing conditions and extremely high concentrations of biogenic elements.

**Пургина Д.В., Моисеева Ю.А., Гершелис Е.В.**

(МНЦ в области экологии и вопросов изменения климата, НТУ Сириус, ФТ Сириус, e-mail: [purgina.dv@talantiuspeh.ru](mailto:purgina.dv@talantiuspeh.ru))

**Мышьяк и фосфор в поровых водах донных отложений эстуарных областей (на примере рек Енисей и Пясина)**

**Purgina D.V., Moiseeva Ya.A., Gershelis E.V.**

(Sirius University of Science and Technology, FT Sirius)

**Arsenic and Phosphorus in the Pore Waters of Estuarine Sediments: A Case Study of the Yenisei and Pyasina Rivers (Kara Sea Shelf)**

Ключевые слова: поровые воды, мышьяк, фосфор, донные отложения, геохимический барьер, Карское море

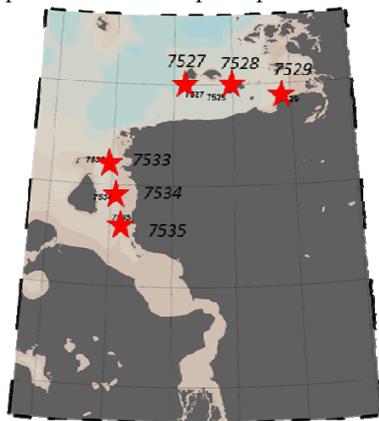
В поровых водах донных отложений приустьевых районов рек Енисей и Пясина изучалось распределение мышьяка и фосфора, а также ассоциированных с ними элементов с целью уточнения условий их накопления. Терригенный снос играет ведущую роль в поставке осадочного вещества в приустьевые районы, а условия смешения речных и морских вод приводят перераспределению микроэлементов в системе поровая вода – донные отложения. Поведение As и P в поровых водах указывает на единый источник их формирования и условий накопления непосредственно в приустьевых участках и требует детального рассмотрения.

Карское море в Северном Ледовитом океане представляет собой важный регион для изучения динамики поровых вод благодаря сложному взаимодействию речного стока, образования морского льда и взаимодействия осадочного материала с водной средой, в результате чего формируется сложная геохимическая картина, требующая пристального внимания.

Особый интерес в рамках этих процессов представляет поведение мышьяка (As). Будучи химическим аналогом фосфора – essential элемента, лимитирующего первичную продукцию в океане, – мышьяк вовлечен в сложный биогеохимический цикл. Его трансформация и миграция тесно сопряжены с циклами других критически важных элементов. В частности, его судьба в морской среде неразрывно связана с redox-процессами, опосредованными железом (Fe) и марганцем (Mn), а также с круговоротом серы и фосфора [1–7].

В данной работе мы сосредоточились на приэстуарных зонах рек Енисей и Пясина шельфа Карского моря. Пробы поровых вод были отобраны на 6 исследовательских станциях в Карском море в период с 21 октября по 5 ноября 2022 г. во время экспедиции на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рис. 1). Осадочные керны отбирались с помощью пробоотборника Multicorer. Поровая вода отбиралась с помощью

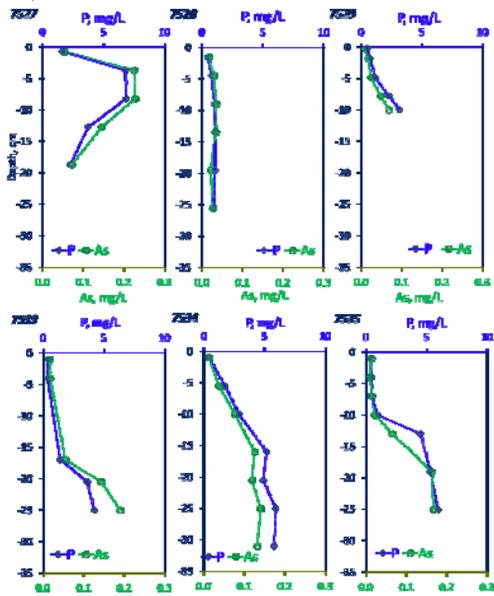
пробоотборника Rhizon [8, 9]. Отбор проб включал введение проб Rhizon в керн осадка через отверстия и получение небольшого объема поровой воды с помощью вакуума и микрофильтрации. Всего для текущего исследования отобрано 37 проб поровой воды и 6 проб придонной.



**Рис. 1.** Схема расположения станций.

Концентрации растворенных форм элементов были определены в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета методом масспектрального анализа с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) (NexIon 300D, Perkin Elmer, USA). Значения pH поровых вод определялись портативным pH-метром HI 991300, значения Eh – прибором HM Digital ORP 200, Redox. Измерения проводились в соответствии с инструкциями производителя. Перед измерениями электроды промывали деионизированной водой. Калибровка проводилась один раз в сутки. Растворенные формы Fe (от 0.3 до 80.1 мг/л), Mn (от 5.8 до 71.9 мг/л), P (от 0.4 до 6.8 мг/л) и As (от 11 до 227 мкг/л) накапливаются с глубиной в поровых водах (рис. 2), что является прямым следствием восстановительных условий, формирующихся в результате микробного разложения органического вещества, при котором происходит последовательное растворение оксидов и гидроксидов Fe и Mn, ассоциированные с которыми редокс-чувствительные элементы переходят в растворенную форму. Мощность окисленного слоя (на основе значений Eh) находится в интервале от 2 до 12 см. Различия в мощностях окисленного слоя между приустьевыми части рек Пясины (до 5 см) и Енисей (до 12 см), связано с различными гидродинамическими условиями рек, оказывающих влияние на седиментацию в исследуемых районах. Величина pH поровых вод составила от 7.00 до 7.87 (NBS), с хорошо проявленной глубинной изменчивостью (рост с глубиной) и высокой степенью корреляции ( $R^2 > 0.85$ ) с растворенным органическим веществом (TOC + TON), что

косвенно указывает на активное развитие процессов дигенетического преобразования приповерхностной части донных отложений (до 30 см). Изменение солёности поровых вод оценивалось по концентрации хлора и демонстрирует консервативное распределение как по латерали (от устья к акватории), так и по глубине и находится в пределах от 12.7 до 20.4 г/л (концентрация Cl<sup>-</sup>).



**Рис. 2.** Глубинное распределение As и P в поровых водах приустьевых районах рек Енисей и Пясины в Карском море.

Корреляционный анализ (рис. 3) показал практически идентичное (что не прослеживается в центральной акватории Карского моря) поведение ( $R^2 > 90\%$ ) между As и P, данная связь позволяет нам говорить о едином источнике и условиях транспорта (миграции) этих элементов в приустьевых районах.

Также важным отличием исследуемых эстуарных областей является наличие корреляционной связи у As и P с Mn на фоне ее отсутствия с Fe в приустьевой области реки Пясины и наоборот наличие связи у As и P с Fe на фоне отсутствия с Mn в приустьевой области реки Енисей (рис. 3). Это явление может быть связано с различиями в гидродинамических условиях осадконакопления и изменениями условий на геохимической границе [10–16]. В районе устья реки Енисей интенсивный сток и турбулентность способствуют осаждению железа в виде оксидов/гидроксидов (особенно при смешении пресной и морской воды), что приводит к его накоплению в

донных отложениях и последующему восстановительному растворению [17]. Напротив, более спокойная обстановка в устье реки Пясины позволяет марганцу оставаться растворенным в течение более длительного времени, особенно в стратифицированных слоях воды, где восстановительные условия усиливают мобилизацию и накопление марганца.

	Eh	pH	TOC	TON	Mn	Fe	Fe:Mn	As	P	P:As	Cl
<i>эстуарий р. Пясины</i>											
Eh	<b>1.00</b>										
pH	-0.14	<b>1.00</b>									
TOC	-0.49	0.15	<b>1.00</b>								
TON	<b>-0.58</b>	-0.25	0.42	<b>1.00</b>							
Mn	-0.20	-0.31	<b>0.56</b>	0.10	<b>1.00</b>						
Fe	-0.23	<b>-0.58</b>	0.01	<b>0.70</b>	-0.03	<b>1.00</b>					
Fe:Mn	-0.13	-0.50	-0.11	<b>0.63</b>	-0.25	<b>0.96</b>	<b>1.00</b>				
As	-0.33	-0.33	0.39	0.27	<b>0.61</b>	0.27	0.05	<b>1.00</b>			
P	-0.36	-0.40	0.36	0.36	<b>0.53</b>	0.42	0.21	<b>0.98</b>	<b>1.00</b>		
P:As	0.00	-0.16	-0.37	0.18	<b>-0.57</b>	0.43	<b>0.56</b>	-0.41	-0.26	<b>1.00</b>	
Cl	<b>-0.50</b>	0.37	<b>0.54</b>	0.06	0.32	-0.26	-0.36	0.40	0.33	<b>-0.68</b>	<b>1.00</b>
<i>эстуарий р. Енисей</i>											
Eh	<b>1.00</b>										
pH	-0.40	<b>1.00</b>									
TOC	-0.01	0.13	<b>1.00</b>								
TON	<b>-0.58</b>	0.28	<b>0.64</b>	<b>1.00</b>							
Mn	<b>0.55</b>	-0.07	<b>0.64</b>	0.23	<b>1.00</b>						
Fe	<b>-0.51</b>	0.00	0.47	<b>0.78</b>	0.12	<b>1.00</b>					
Fe:Mn	<b>-0.88</b>	0.29	-0.21	0.33	<b>-0.68</b>	0.42	<b>1.00</b>				
As	<b>-0.88</b>	0.50	0.12	<b>0.62</b>	-0.44	<b>0.57</b>	<b>0.77</b>	<b>1.00</b>			
P	<b>-0.88</b>	0.33	0.14	<b>0.68</b>	-0.37	<b>0.71</b>	<b>0.83</b>	<b>0.91</b>	<b>1.00</b>		
P:As	-0.15	-0.36	0.24	0.32	0.24	<b>0.53</b>	0.22	-0.05	0.32	<b>1.00</b>	
Cl	-0.33	-0.07	<b>-0.55</b>	-0.36	<b>-0.88</b>	-0.28	0.50	0.27	0.23	-0.27	<b>1</b>

**Рис. 3.** Матрица коэффициентов прямой корреляции геохимических показателей и мышьяк-ассоциированных элементов в приустьевых районах рек Пясины (таблица сверху) и Енисей (таблица снизу).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang S.Y. et al. Land scale biogeography of arsenic biotransformation genes in estuarine wetland // Environ. Microbiol. 2017. V. 19. P. 2468–2482.
2. Wolfe-Simon F. et al. Response to comments on ‘A bacterium that can grow using arsenic instead of phosphorus’ // Science. 2011. V. 332.
3. Mamindy-Pajany Y. et al. Arsenic in marine sediments from French Mediterranean ports: Geochemical partitioning, bioavailability and ecotoxicology // Chemosphere. 2013. V. 90. P. 2730–2736.
4. Singh A., Giri K. Effect of arsenate substitution on phosphate repository of cell: A computational study // R. Soc. Open Sci. 2018. V. 5.
5. Zhang C. et al. Unexpected genetic and microbial diversity for arsenic cycling in deep sea cold seep sediments. npj Biofilms // Microbiomes. 2023. V. 9. 13.

6. Byeon E., Kang H. M., Yoon C., Lee J.S. Toxicity mechanisms of arsenic compounds in aquatic organisms // *Aquat. Toxicol.* 2021. V. 237. 105901.
7. Knodle R., Agarwal P., Brown M. From phosphorous to arsenic: Changing the classic paradigm for the structure of biomolecules // *Biomolecules.* 2012. V. 2. P. 282–287.
8. Seeberg-Elverfeldt J., Schlüter M., Feseker T., Kölling M. Rhizon sampling of porewaters near the sediment-water interface of aquatic systems // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2005. V. 3. P. 361–371.
9. Dickens G.R., Koelling M., Smith D.C., Schnieders L. & the IODP Expedition 302 Scientists. Rhizon Sampling of Pore Waters on Scientific Drilling Expeditions: An Example from the IODP Expedition 302, Arctic Coring Expedition (ACEX). *Sci. Drill.* 2007. V. 4. P. 22–25.
10. Akimov D.B., Johannessen O.M., Mitnik L.M., Volkov V.A. Satellite radar signatures of fronts in the Ob and Yenisey estuaries in the Kara Sea // *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 1999. V. 5. P. 2542–2544.
11. Harms I.H., Karcher M.J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // *J. Geophys. Res. Ocean.* 1999. V. 104. P. 13431–13448.
12. Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // *Sib. River Run-Off Kara Sea Charact. Quantif. Var. Environ. Significance / Stein R., Fahl K., Futterer D.K. et al. (Eds.). Proc. Mar. Sci.* V. 6. Elsevier, 2003. P. 9–25.
13. Tesi T. et al. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2014. V. 133. P. 235–256.
14. Osadchiv A. et al. Structure of the Ob-Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation // *Front. Mar. Sci.* 2023. V. 10. P. 1–13.
15. Savenko A.V., Pokrovsky O.S., Streletskaya I.D. Distribution of dissolved chemical elements in the Yenisei river estuary and adjacent water area of the Kara Sea // *Materials of XXVI International coastal conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world".* 2016.
16. Canfield D.E., Thamdrup B., Hansen J.W. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: Iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1993. V. 57. P. 3867–3883.
17. Strawn D.G. Review of interactions between phosphorus and arsenic in soils from four case studies // *Geochem. Trans.* 2018. V. 19. P. 1–13.

The distribution of arsenic and phosphorus, as well as associated elements, in pore waters of bottom sediments in the estuarine areas of the Yenisei and Pyasina rivers was studied to clarify the conditions of their accumulation. Terrigenous sedimentation plays a leading role in the supply of sediment to estuarine areas, and the mixing of river and seawater leads to the redistribution of trace elements in the pore water–bottom sediment system. The behavior of As and P in pore waters indicates a common source of their formation and accumulation conditions directly in the estuarine areas and requires detailed consideration.

**Пушкарева Е.М.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [kate-mp@mail.ru](mailto:kate-mp@mail.ru))

## **Первые данные о содержании гуминовых веществ в верхнем слое донных осадков Карского моря**

**Pushkareva E.M.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **First data on the humic substances content in the upper layer of bottom sediments of the Kara Sea**

Ключевые слова: органическое вещество, гуминовые вещества, гуминовые кислоты, фульвокислоты, Карское море.

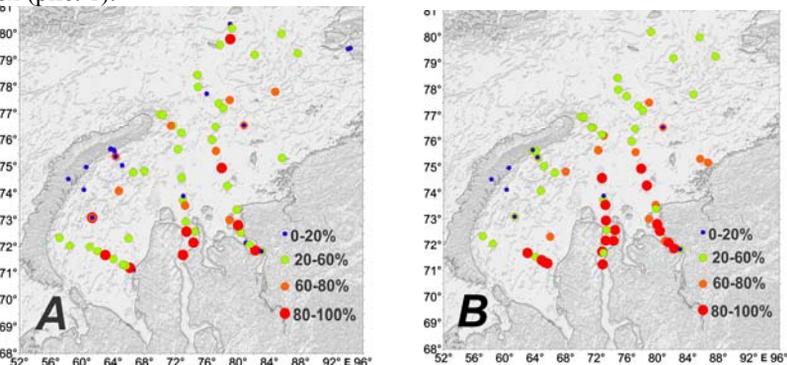
Разработана методика определения содержания гуминовых веществ (ГВ) в донных осадках при помощи щелочной экстракции с последующим определением концентрации углерода в водных вытяжках на анализаторе TOC-Vcph. Исследовано содержание гуминовых веществ в верхнем слое донных осадков (0–10 см) Карского моря. Доля ГВ в составе ОВ увеличивается в эстуарных зонах Оби и Енисея и уменьшается по мере удаления от берега. Минимальные концентрации ГВ фиксируются в заливах архипелага Новая Земля и в районе арх. Северная Земля.

Состав и содержание органического вещества (ОВ) донных осадков (ДО) Карского моря являются сравнительно хорошо изученным для арктического региона [8]. Однако пути миграции органического углерода в морской среде до сих пор остаются недостаточно ясными. Для шельфовых морей, говоря о составе органического вещества, поступающего с суши, особый интерес может представлять исследование гуминовых веществ (ГВ).

Определение содержания гуминовых веществ в осадках ранее было достаточно широко распространено, но в настоящее время данные исследования проводятся сравнительно редко. Содержание ГВ в осадках Карского моря практически не изучено, при этом имеются данные о высоком содержании ГВ в осадках других шельфовых морей [1]. Таким образом, целью данной работы является определение концентраций гуминовых веществ в донных осадках и выявление связи их содержания с содержанием органического углерода (ОУ).

Основой для исследования послужила коллекция донных осадков из поверхностного слоя, собранная в процессе многолетних исследований Карского моря по программе "Экосистемы морей Сибирской Арктики", в образцах которой ранее были определены гранулометрический состав и содержание органического углерода [4]. Для выполнения анализов была разработана методика щелочной экстракции для определения ГВ донных осадков, при помощи которой было проведено исследование гуминовых (ГК) в 192 образцах ДО из поверхностных (0–1 см) и подстилающих (5–10 см) горизонтов. Станции пробоотбора охватывают практически все районы

моря (рис. 1).



**Рис. 1.** Относительное содержание гуминовых веществ в донных осадках Карского моря (масс. %  $C_{гв}$  от  $C_{орг}$ ). А – в поверхностном слое (0–1 см), В – в подстилающих горизонтах (5–10 см).

В почвоведении гуминовые и фульвовые кислоты являются стандартно определяемыми компонентами ОВ, однако единая аналитическая методика их определения отсутствует даже для почв [2, 7]. Применяются разные методики экстракции и определения содержания гумусовых веществ: щелочная экстракция гидроксидом натрия или пирофосфатом натрия (наиболее распространен) [3, 7] и экстракция органическими растворителями (встречается редко) [7]. Для донных осадков данных о методах исследования намного меньше, чем для анализа почвенных образцов [5, 6].

В процессе адаптации существующих методов определения ГВ и выбора наиболее оптимального их варианта, изменения, внесенные в методику, затронули практически каждую стадию анализа. Многие использованные практики применялись ранее, однако их комбинация позволяет говорить о разработке нового метода на базе известных, а не об усовершенствовании существующих методик. Метод многократной экстракции в щелочной среде (0.1N NaOH) с предварительной ультразвуковой диспергацией образца в токе азота и последующим определением содержания гуминовых и фульвовых кислот в экстракте с помощью анализатора ТОС-Vсрh включает в себя следующие стадии: 1. Удаление карбонатов из осадка соляной кислотой для обеспечения более полной экстракции ГВ из ДО и увеличения точности измерения углерода в экстракте за счет снижения концентраций неорганического углерода. 2. Многократная длительная экстракция ГВ в щелочной среде (0.1N NaOH, 60°C) для обеспечения наиболее полного извлечения их из матрицы осадка. 3. Применение предварительной продувки образца в щелочной среде азотом и ультразвуковой диспергации для предотвращения кислородного окисления и ускорения экстракции. 4.

Применение центрифугирования для отделения осадка от супернатанта в целях предотвращения потерь образца и ускорения анализа. 5. Подкисление аликвоты экстракта до pH 2 (ГК выпадают в осадок), продувка азотом и подщелачивание аликвоты до pH 4–5 (ГК переходят обратно в раствор) для максимального снижения концентраций CO<sub>2</sub> в растворе. 6. Определение содержания органического углерода в аликвоте экстракта на анализаторе Shimadzu TOC-Vcph. 7. Повторное измерение содержания органического углерода в предварительно подкисленной до pH 2 и профильтрованной аликвоте для определения концентраций фульвовых кислот. 8. Расчет содержания ГВ, ГК и ФК в образцах осадков по соотношению их концентраций в экстракте и массе образца.

Таблица. Концентрации гуминовых веществ в осадках

		Доля гуминовых веществ в составе ОВ (Сгв/Сорг % масс.)					
		0-100%	0-20%	20-60%	60-80%	80-100%	
Все пробы	число проб		192	37	104	29	22
	Сорг, %	средн.	1,3	1,5	1,3	1,1	1,3
		мин-макс	0,01-4,6	0,4-4,6	0,1-3,1	0,1-3,1	0,01-3,1
	Сгв мгС/г осадка	средн.	5,2	1,8	5,2	7,1	8,3
		мин-макс	0,2-18,8	0,3-4,9	0,5-12,9	0,8-18,8	0,2-16,4
Сгв / Сорг %	средн.	47	12	42	72	92	
	мин-макс	3-100	3-20	20-60	61-80	81-100	
Поверхность	число проб		117	24	67	13	13
	Сорг, %	средн.	1,3	1,5	1,3	1,1	1,2
		мин-макс	0,01-4,6	0,4-4,6	0,1-3,1	0,1-3,1	0,01-3,1
	Сгв мгС/г осадка	средн.	4,5	1,9	5	5,3	6,5
		мин-макс	0,2-15,9	0,3-4,9	0,5-12,9	0,8-15,9	0,2-14,1
Сгв / Сорг %	средн.	43	13	40	70	92	
	мин-макс	3-100	3-20	20-60	61-76	81-100	
Подстилаящий	число проб		75	13	37	16	9
	Сорг, %	средн.	1,3	1,4	1,2	1,2	1,3-
		мин-макс	0,4-3,1	0,9-3,1	0,4-2,2	0,4-2,5	0,4-2,2
	Сгв мгС/г осадка	средн.	6,1	1,7	5,5	8,5	10,8
		мин-макс	0,6-18,8	0,6-3,6	1,6-10,4	2,7-18,8	3,5-16,4
Сгв / Сорг %	средн.	52	12	46	73	92	
	мин-макс	5-100	5-18	30-60	61-80	84-100	

Концентрации гуминовых веществ в исследованных образцах варьируются от 0.2 до 18.8 мгС/г сух. в., при средней концентрации 5 мгС/г. Доля гуминовых веществ в составе органического углерода донных осадков меняется от 3 до 100% масс., при среднем содержании 47%. Прямой связи увеличения концентрации ГВ в осадках при росте содержания в них С<sub>орг</sub> не выявлено, высокая доля ГВ в органическом веществе осадков встречается как в области низких, так и высоких значений С<sub>орг</sub> (таблица). Минимальная доля ГВ в составе С<sub>орг</sub> характерна в основном для станций, расположенных вблизи восточного побережья Северного острова арх. Новая Земля и в районе арх. Северная Земля. Максимальная доля прослеживается в

эстуарных зонах Оби и Енисея (рисунок). Распределение ГВ в зависимости от глубины залегания горизонта неоднородно. При этом в поверхностном слое ДО доля ГВ зачастую меньше (средн. – 43% масс.), чем в подстилающем горизонте (средн. – 52% масс.) (рис. 1 А, В). Наиболее ярко это проявляется в диапазоне для 20–60% масс.

Таким образом, максимальное содержание гуминовых веществ в донных осадках Карского моря характерно для эстуарной части рек Обь и Енисей. Минимальные концентрации были зафиксированы в районах заливов архипелага Новая Земля. При этом в донных осадках заливов содержание ГВ существенно ниже, чем в центральной части Карского моря. Высокие концентрации ГВ в зонах маргинального фильтра рек Оби и Енисея и постепенное их снижение по направлению к открытой части моря могут обуславливаться поставкой вещества с речным стоком.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С. и др. Органическое вещество донных отложений полярных зон мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.
2. Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В. и др. Гуминовые вещества: гипотезы и реальность (обзор) // Почвоведение. 2021. С. 1449–1480.
3. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 272 с.
4. Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Дорохова Е.В. Связь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков Карского моря // В настоящем сборнике
5. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
6. Ходоренко Н.Д., Волкова Т.И., Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Кинетика извлечения и количественное определение гуминовых веществ в донных отложениях // Геохимия. 2012. Т. 49 (4). С. 423–430.
7. Hayes M.H.B. Soil organic matter extraction, fractionation, structure and effects on soil structure // The Role of Organic Matter in Modern Agriculture. Developments in Plant and Soil Sciences. Dordrecht: Springer, 1986. V. 25. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-4426-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4426-8_9)
8. Martens J. et al. CASCADE – The Circum-Arctic Sediment Carbon DatabasE // Earth Syst Sci Data. 2021. V. 13. P. 2561–2572. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2561-2021>.

A method has been developed for determining the content of humic substances (HS) in bottom sediments using alkaline extraction with subsequent determination of the concentration of HS carbon in aqueous alkaline solutions using a TOC-Vcph analyzer. The content of humic substances in the upper layer of bottom sediments (0–10 cm) of the Kara Sea has been studied. The share of HS in the composition of OM increases in the estuarine zones of the Ob and Yenisei and decreases with distance from the coast. Minimum concentrations of HS are recorded in the bays of the Novaya Zemlya archipelago and in the area of the continental slope.

**Римская-Корсакова М.Н., Дубинин А.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: korsakova@ocean.ru)

**Растворенные и лабильные взвешенные формы Мо, W и V в воде Черного моря**

**Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinin A.V**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Dissolved and labile particulate species of Mo, W and V in Black Sea water**

Ключевые слова: молибден, вольфрам, ванадий, Черное море, анокия

Данные по распределению растворенных молибдена, вольфрама и ванадия до глубины 320 м приведены для северо-восточной части Черного моря. Рассмотрено поведение растворенной (<0.45 мкм) и растворенной + лабильной взвешенной форм элементов во взаимосвязи с такими макрокомпонентами, как марганец, железо и фосфор.

Водную толщу большей части Черного моря можно условно разделить на три зоны – кислородную зону, занимающую ~13% от всего объема вод Черного моря от поверхности до глубин порядка 90–180 м; сероводородную – заполняющую практически всю черноморскую впадину; и тонкую субкислородную зону, разделяющую первые две. В субкислородной зоне концентрация кислорода становится менее 10 мкМ и сероводорода – менее 3 мкМ, но присутствуют в заметных количествах взвешенные оксигидроксиды марганца. Марганец, а также железо и фосфор играют ключевую роль в формировании аутигенной взвеси в субкислородных условиях верхней части анаэробных вод. Взвешенные оксигидроксиды марганца и железа обладают высокой сорбционной способностью по отношению к растворенным микроэлементам. Таким образом, образование и растворение оксигидроксидов при смене редокс-условий среды способствует разнонаправленному транспорту микроэлементов в пределах субкислородной зоны. Цель данного исследования – изучение поведения растворенных микроэлементов (Mo, W и V) на границе аэробных и анаэробных вод.

Элементы в морской воде элементы находятся как в растворенной, так и во взвешенной форме. В данной работе была сделана попытка рассмотреть лабильную часть взвешенного вещества. Элемент, находясь в лабильном состоянии в составе сорбированных комплексов или легкорастворимых соединений во взвеси, может легко переходить в раствор. Влияние лабильного взвешенного вещества было рассмотрено на основании отбора параллельных проб морской воды, одна из которых была отфильтрована и немедленно подкислена на борту судна, а вторая была подкислена на борту

судна и отфильтрована перед проведением анализа в стационарной лаборатории спустя примерно 4 месяца. При этом предполагалось, что во втором случае в растворенное состояние переходит лабильная (кислоторастворимая) часть взвеси, которая рассчитывалась как разница между концентрациями элементов в параллельных пробах с разной подготовкой.

Пробы воды отбирали на станции, расположенной в 8 милях от Голубой бухты г. Геленджика в пределах континентального склона ( $44.489^\circ$  с.ш. и  $37.869^\circ$  в.д.; глубина дна 1246 м). Отбор производился до глубины 320 м 11 июля 2016 г. и 11 июля 2017 г. Молибден, W, V в растворе 5%  $\text{HNO}_3$  определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), после предварительного концентрирования на октадецилкремнеземе (C18) в виде комплекса с 8-оксихинолином [1]. Растворенный Mn анализировали методом ИСП-МС после разбавления образца морской воды в 2 раза в растворе 5%  $\text{HNO}_3$ . Растворенные Fe и P определяли спектрофотометрически.

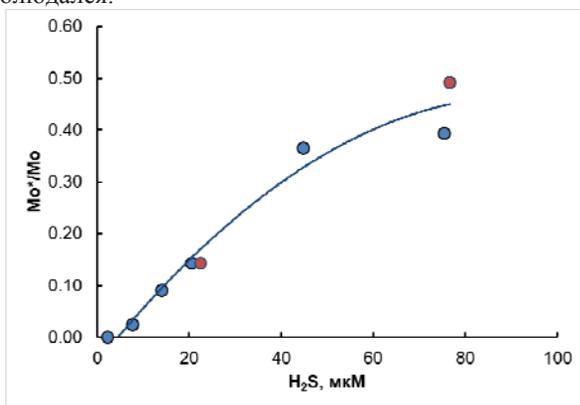
В кислородной зоне концентрации растворенного Mn были минимальны и возрастали в анаэробной зоне, где достигали максимальных значений (10-12 мкмоль/кг). Распределение железа сходно с марганцем, однако концентрации растворенного Fe меньше: в верхней части сероводородной зоны они не превышали 0.3 мкмоль/кг. При используемом методе анализа сумма растворенной и лабильной форм железа практически не отличалась от растворенной формы железа, так как доля взвешенной формы железа слишком мала. Для марганца характерно 10-кратное увеличение лабильной формы с глубиной в окисленной зоне до горизонта с условной плотностью  $15.84 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  (соленость 20.5 psu), где марганец находится во взвешенном состоянии в нефелоидном слое.

Поведение Mo, W и V контролируется окислительно-восстановительными реакциями с участием Mn и Fe. На границе окисленной и восстановленной зон происходит резкое уменьшение содержания молибдена от 38 нмоль/кг до 3 нмоль/кг, что связано с сорбцией молибдена на взвешенном веществе состава Fe-Mo-S. Окисление диффундирующих из анаэробной зоны растворенных марганца и железа приводит к появлению во взвеси лабильных (подвижных, реактивных) кислоторастворимых форм оксигидроксидов. Изменение концентраций ванадия и вольфрама в водной толще Черного моря вызвано их сорбцией на оксигидроксидах марганца, который присутствует во взвешенном состоянии в зоне дефицита кислорода. Восстановительное растворение оксигидроксидов марганца в верхней части анаэробной зоны приводит к формированию повышенных концентраций ванадия (до 15.5 нмоль/кг) и вольфрама (до 221 пмоль/кг).

Доля лабильной взвешенной формы исследованных элементов слишком мала, чтобы заметно влиять на общую растворенную концентрацию. Однако

в случае для ванадия в поверхностном горизонте и в нефлоидном слое она может достигать 34 и 43% соответственно.

Концентрация молибдена в анаэробной зоне в подкисленных азотной кислотой образцах со взвешенным веществом оказалась систематически меньше, чем концентрация растворенного молибдена в образцах, где взвесь отфильтровали до подкисления. В анаэробной зоне Мо присутствует в виде взвешенных частиц  $\text{FeMo}_{0.6}\text{S}_{2.8}$  [2] или  $\text{FeMoS}_4$  [3]. В нефiltroванных пробах в результате изменения pH (подкисление до pH=2) происходит их растворение. Устойчивой твердой фазой молибдена в растворе подкисленной черноморской воды становится  $\text{MoS}_2$ . Восстановление молибдена Мо(VI) до Мо(IV) приводит к окислению  $\text{S}^{2-}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  в растворе. Равновесная концентрация молибдена в растворе с низким pH, вероятно, поддерживается растворимостью твердой фазы  $\text{MoS}_2$ , и, благодаря этому равновесию, при увеличении концентрации сульфида в растворе с увеличением глубины моря количество перешедшего в твердую фазу молибдена увеличивается (рисунок). Подобный эффект для вольфрама и ванадия не наблюдался.



**Рисунок.** Изменение отношения концентрации молибдена в подкисленных растворах морской воды без фильтрования ( $\text{Mo}^*$ ) к концентрации молибдена в предварительно отфильтрованных пробах при увеличении концентрации сульфидов в растворе. Синий цвет – 2016, красный – 2017.

Исследование выполнено за счет средств Госзадания ИОРАН №FMWE-2024-0018

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Римская-Корсакова М.Н., Бережная Е.Д., Дубинин А.В. Определение молибдена, вольфрама и ванадия в воде атлантического океана методом исп-мс после концентрирования твердофазной экстракцией с 8-оксихинолином // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 587–596.

2. Vorliceck T.P., Helz G.R., Chappaz A. et al. Molybdenum burial mechanism in sulfidic sediments: Iron-Sulfide pathway // ACS Earth and Space Chemistry. 2018. V. 2. P. 565–576.
3. Helz G.R., Bura-Nakić E., Mikac N., Ciglencčki I. New model for molybdenum behavior in euxinic waters // Chem. Geol. 2011. V. 284. P. 323–332.

Distribution of dissolved molybdenum, tungsten, and vanadium was investigated in the northeastern part of the Black Sea down to a depth of 320 m. Dissolved ( $<0.45 \mu\text{m}$ ) and dissolved plus labile particulate species of Mo, W and V are considered in relation with major constituents Mn, Fe and P controlling their behavior.

**Саввичев А.С.<sup>1</sup>, Русанов И.И.<sup>1</sup>, Засько Д.Н.<sup>2</sup>, Пименов Н.В.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва, e-mail: [savvichev@mail.ru](mailto:savvichev@mail.ru); <sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [dasha\\_zas@mail.ru](mailto:dasha_zas@mail.ru))

**Автотрофная продукция и гетеротрофная бактериальная активность в морях Восточной Арктики (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Берингов пролив)**

**Savvichev A.S.<sup>1</sup>, Rusanov I.I.<sup>1</sup>, Zasko D.N.<sup>2</sup>, Pimenov N.V.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Winogradsky Institute of Microbiology Research Centre of Biotechnology RAS, Moscow; <sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Autotrophic production and heterotrophic bacterial activity in the Seas of the Eastern Arctic (Laptev, East Siberian, Chukchi seas and Bering Strait)**

Ключевые слова: моря Восточной Арктики, автотрофная продукция, темновая ассимиляция углекислоты, общая численность бактерий

Получены количественные данные величин первичной продукции, темновой ассимиляции CO<sub>2</sub>, а также общей численности бактериопланктона в водной толще морей Восточной Арктики. Показано, что в Восточно Сибирском и Чукотском морях преобладают деструкционные процессы, в то время как в Чукотском море и Беринговом проливе преобладают продукционные процессы.

Полученные за последние десятилетия данные свидетельствуют о крупномасштабных климатических изменениях в Северном Ледовитом океане [1], особенно в шельфовых морях Восточного сектора Российской Арктики [2]. Влияние сокращения арктического ледяного покрова на морскую первичную продукцию (ПП) в последнее время в основном изучалось с использованием спутниковых оценок хлорофилла-*a* (Хл *a*), температуры поверхности моря и концентрации морского льда, а также различных подходов к моделированию. Однако отсутствуют данные о количественных соотношениях между автотрофной продукцией фитопланктона и активностью гетеротрофного бактериопланктона в самом широком и мелководном шельфе Мирового океана – морях Восточной Арктики. Мы представляем полный набор *in situ* измерений основных характеристик автотрофной и гетеротрофной микробной активности, необходимых для лучшего понимания и дальнейшей валидации спутниковых и модельных подходов. В 57-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Чукотском, Восточно-Сибирском морях, морях Лаптевых и Анадырском заливе Берингова моря (всего 26 станций) методом *in situ* с использованием свежееотобранных образцов водной толщи и меченого бикарбоната определяли интенсивности световой и темновой (ТАУ) ассимиляции CO<sub>2</sub>. ПП определяли по традиционной методике [3] с

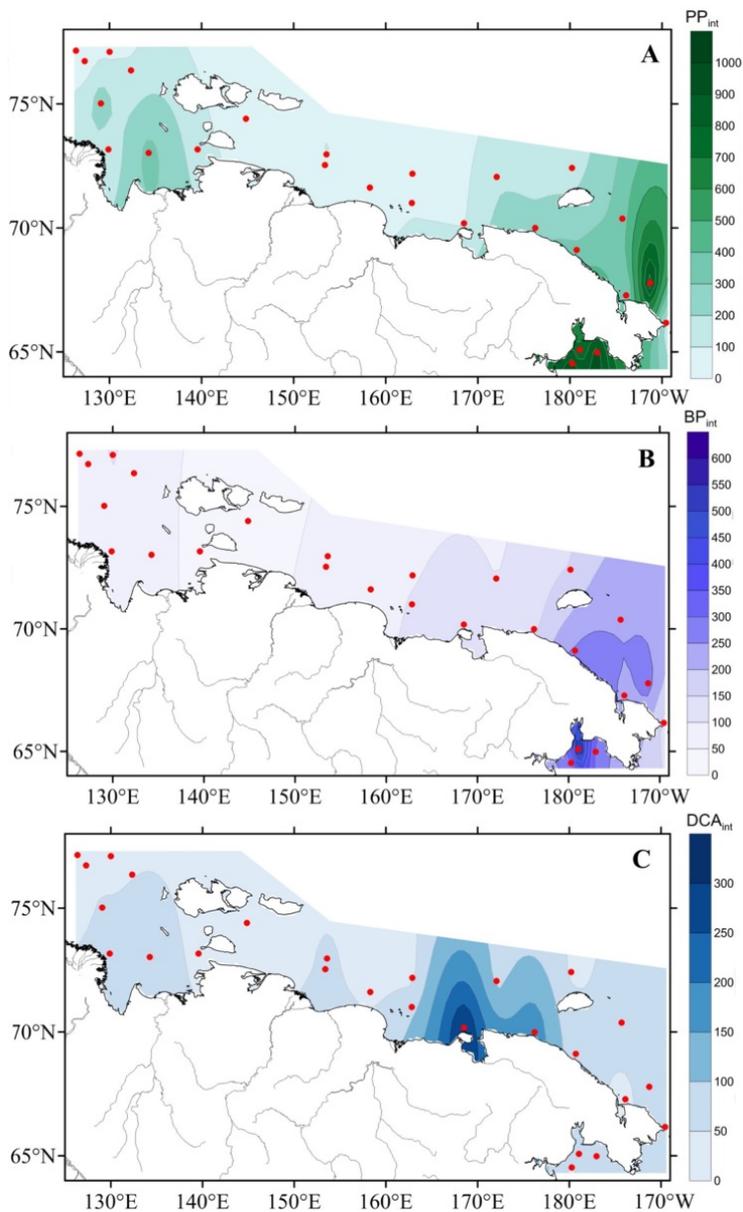
модификацией [4, 5]), которая ранее применялась нами в арктических морях [6]. Темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  является интегральным показателем, характеризующим активность автотрофных (хемоавтотрофных) и гетеротрофных микроорганизмов. Известно, что все известные микроорганизмы, в том числе хемогетеротрофы и метанотрофы, ассимилируют бикарбонатный углерод, превращая его в различные органические соединения. В арктическом бактериопланктоне ТАУ осуществляется гаммапротеобактериями (преобладающая группа) и бетапротеобактериями и хорошо коррелирует с величинами бактериальной продукции (БП) [7].

Экспозицию образцов с меченым  $\text{CO}_2$  проводили в условиях максимально близких к натурным. Конечное нахождение меченого углерода определяли не только в составе органического вещества клеточной биомассы, но также в составе растворенного органического вещества. Величины общей численности бактерий, а также биомассы бактериопланктона определяли микроскопически на окрашенных препаратах [8]. Состояние фито- и бактериопланктона определяли путем анализа соотношений БП/ПП и ТАУ/ПП.

Все три важных показателя продукции имели значительную изменчивость в пределах исследованных акваторий Арктики (ПП от 0.98 до 54.7  $\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$ ), (БП от 1.1 до 17.1  $\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$ ) и (ТАУ от 0.23 до 8.7  $\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$ ). Наибольшая численность бактериопланктона ( $0.52 \times 10^6$  кл/мл) и биомасса (3.4  $\text{мкг С/л}$ ) обнаружены на станциях Анадырского залива. Наименьшая численность бактериопланктона выявлена на наиболее удаленных от побережья Восточно-Сибирского моря станциях ( $0.12\text{--}0.20 \times 10^6$  кл/мл). Экспериментальные данные о скоростях процессов в горизонтах толщи воды были использованы для расчета интегральных величин ( $\text{PP}_{\text{int}}$ ,  $\text{BP}_{\text{int}}$  и  $\text{DCA}_{\text{int}}$ ), приведенных на рисунке.

В прибрежных водах восточной части Чукотского моря и в Анадырском заливе наблюдался активный фотосинтез с эффективным включением неорганического углерода в биомассу. Напротив, в олиготрофных бассейнах Восточно-Сибирского и моря Лаптевых первичная продукция фитопланктона была крайне низкой, тогда как активность гетеротрофного бактериопланктона, потребляющего органическое вещество терригенного происхождения, была относительно высокой. Доля ассимилированного углерода  $\text{CO}_2$  в РОВ варьировала в широких пределах, иногда достигая 90% (в среднем ~50%). Этот результат показывает, что РОВ, вероятно, является основным субстратом, поддерживающим микробную петлю в арктических морях.

Данные прямых измерений могут быть использованы для дальнейшей корректировки косвенных оценок продукции, полученных с помощью спутниковых наблюдений.



**Рисунок.** Расчетные характеристики продукционных процессов в водной толще морей Восточной Арктики:  $PP_{int}$  – net primary production,  $DCA_{int}$  – dark  $CO_2$  assimilation,  $BP_{int}$  – bacterial production ( $mg\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ).

Работа выполнена в соответствии с программой госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moritz R.E., Bitz C.M., Steig E.G. Dynamics of recent climate change in the Arctic // *Science*. 2002. V. 297. P. 1497–1502.
2. Crane K. Russian-American long-term census of the Arctic. I initial expedition to the Bering and Chukchi Seas // *Arctic Research of the United States*. 2005. V. 9. P. 73–76.
3. Steemann Nielsen E., Hansen V. Kr. Measurements with the carbon-14 technique of the respiration rates in natural populations of phytoplankton // *Deep Sea Research*. 1958. V. 5. P. 222–233.
4. Sorokin Y.I. *Radioisotopic Methods in Hydrobiology*. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
5. González-Benítez N., García-Corral L.S., Morán X.A.G. et al. Drivers of microbial carbon fluxes variability in two oligotrophic Mediterranean coastal systems // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. 17669. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53650-z>
6. Savvichev A.S., Rusanov I.I., Pimenov N.V. et al. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Chukchi Sea // *Microbiology (Moscow)*. 2007. V. 76. P. 603–613.
7. Alonso-Saez L., Galand P.E., Casamayor E.O. et al. High bicarbonate assimilation in the dark by Arctic bacteria // *The ISME Journal*. 2010. V. 4. P. 1581–1590.
8. Hobbie J.T., Daley R.J., Jasper S. Use of Nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // *Applied and Environmental Microbiology*. 1977. V. 33. P. 1225–1228.

Quantitative data on the values of primary production, dark assimilation of CO<sub>2</sub>, and the total number of bacterioplankton in the water column of the seas of the Eastern Arctic were obtained. It was shown that destructive processes predominate in the East Siberian and Chukchi Seas, while production processes predominate in the Chukchi Sea and the Bering Strait.

**Сашова О.А.<sup>1</sup>, Мошаров С.А.<sup>2</sup>, Боровкова К.А.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: [olga\\_sashova@mail.ru](mailto:olga_sashova@mail.ru); <sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; <sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград)

## **Изменчивость продукционной активности фитопланктона в районах взаимодействия вод разного генезиса в западной и северной частях Карского моря**

**Sashova O.A.<sup>1</sup>, Mosharov S.A.<sup>2</sup>, Borovkova K.A.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; <sup>3</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad)

## **Variability of phytoplankton productive activity in areas of interaction of waters of different genesis in the western and northern parts of the Kara Sea**

Ключевые слова: первичная продуктивность, фотосинтетическая эффективность фитопланктона, Карское море

Продукционная активность фитопланктона изучалась в восточной и северной части Карского моря в летний период (июль–август 2024 г.). Удельная первичная продукция и фотосинтетическая эффективность фитопланктона в значительной степени варьирует в районах с выраженной гидрофизической и гидрохимической зональностью, что определяет разнообразие условий формирования первичной продукции.

В Карском море происходит взаимодействие нескольких водных масс: баренцевоморского происхождения, вод арктического бассейна, речных вод [1] и талых вод [2]. Выраженная гидрофизическая и гидрохимическая зональность Карского моря определяет разнообразие условий формирования первичной продукции. В данной работе мы поставили задачу изучить продукционную активность фитопланктона в районах взаимодействия вод разного генезиса.

Материал был собран в ходе экспедиции НИС «Профессор Молчанов» по программе «Плывущий университет» МФТИ-ИО РАН в Карском море в период с 24 июля по 2 августа 2024 г. Пробы воды отбирали с помощью пластиковых батометров Нискина на 15 станциях с поверхностного горизонта. Концентрацию хлорофилла *a* в воде измеряли методом флуоресценции ацетонового экстракта [3]. Концентрация хлорофилла *a* была рассчитана согласно [4].

Активную флуоресценцию хлорофилла *a* измеряли с помощью флуориметра WATER-PAM-II (Walz, Германия) [5]. Перед измерением образцы выдерживали в темноте не менее 20 мин. Проводилось измерение максимальной квантовой эффективности фотосинтеза ( $F_v/F_m$ ) и скорости электронного транспорта ( $rETR$ ) в PSII. Значение  $F_v/F_m$  указывает на

потенциальную фотосинтетическую способность фитопланктона. Величина  $gETR$  позволяет количественно оценить скорость перехода солнечной энергии в химическую энергию клетки, обеспечивающую процессы биосинтеза органического вещества фитопланктоном. Для оценки фотосинтетической активности фитопланктона было рассчитано ассимиляционное число ( $AЧ$ ) – величина, показывающая соотношение синтезированного органического углерода к хлорофиллу  $a$  за час и характеризующая скорость фотосинтеза. Эффективность фотосинтеза, отражающая степень использования световой энергии, улавливаемой в процессах синтеза органических веществ, может быть выражена через соотношение значений  $AЧ$  и  $gETR$ .

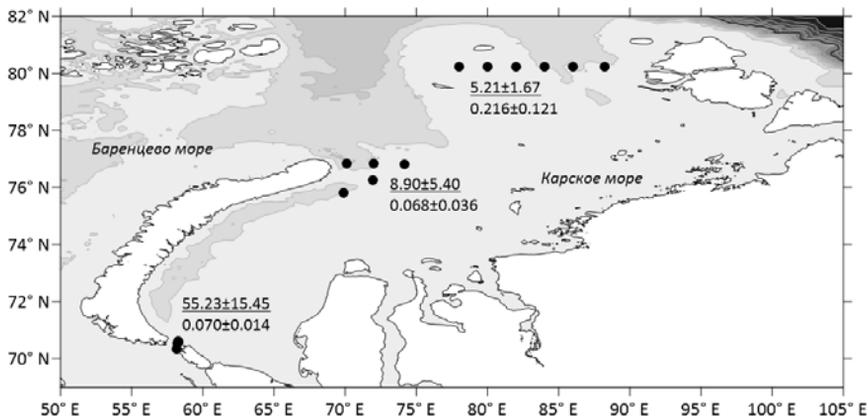
В проливе Карские ворота происходит перемешивание более пресных и холодных вод Карского моря и теплых и соленых вод Баренцева моря, что приводит к возникновению перепадов значений температуры и солености. В проливе значения ассимиляционного числа варьировали от 1.54 до 2.51,  $gETR$  изменялась от 24.33 до 41.75. Наибольшие значения были отмечены на станции, расположенной ближе к Баренцеву морю, где температура была немного выше, что могло обуславливать более высокую фотосинтетическую активность фитопланктона. В Карских воротах величины первичной продукции были в несколько раз выше, чем в других районах, и определялись в большей степени концентрацией хлорофилла  $a$  и в меньшей степени – фотосинтетической эффективностью фитопланктона (рисунок).

Район у северной оконечности Новой Земли интересен наличием порога Брусилова, через который может происходить заток атлантических вод из желоба Святой Анны в Новоземельский желоб. В ходе данной экспедиции заток атлантических вод наблюдался, что обусловлено небольшой толщиной поверхностного теплого течения, которое не блокировало водообмен [6]. Значения ассимиляционного числа и  $gETR$  были высокими и варьировали от 1.37 до 5.33 и от 38.50 до 51.25 соответственно.

В западной части желоба Воронина значения ассимиляционного числа и  $gETR$  были выше, чем в остальных частях данного района, и составляли 4.11–8.60 и 18.80–27.30 соответственно. Здесь же были отмечены высокие значения фотосинтетической эффективности ( $AЧ/gETR$ ). Скорее всего, водная масса здесь – это поверхностные воды, некоторое время перемещавшиеся вместе с баренцевоморской ветвью атлантических вод. В процессе эти поверхностные воды осолонялись из-за перемешивания с баренцевоморскими атлантическими водами, что и объясняет их высокую соленость [7]. На остальных станциях в желобе Воронина поверхностный слой был преимущественно образован тальми водами, значения ассимиляционного числа,  $gETR$  и фотосинтетической эффективности ( $AЧ/gETR$ ) были ниже.

Фотосинтетическая эффективность ( $AЧ/gETR$ ), рассчитанная для каждой пробы, варьировала от 0.058 до 0.088 в Карских воротах, от 0.027 до 0.114 у

северной оконечности Новой Земли и от 0.081 до 0.402 в желобе Воронина (рисунок). Таким образом, фотосинтетическая эффективность, отражающая количество синтезированного органического вещества на единицу уловленной и запасенной световой энергии, была в два раза выше в желобе Воронина в зоне влияния атлантических вод.



**Рисунок.** Схема расположения станций, средние значения суточной первичной продукции (мгС/м<sup>3</sup>, над чертой) и средние значения фотосинтетической эффективности (АЧ/гЕТR, под чертой) для каждого района.

Авторы выражают благодарность участникам экспедиции за помощь в сборе материала и измерение гидрологических показателей. Работа выполнена в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-03-2024-117).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов П.О., Ижицкий А.С., Осадчиев А.А. и др. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
2. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Хлебопашев П.В. О выделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря в 1993 и 2007 гг. // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 740–747.
3. JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study Protocols) // Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS) Core Measurements. UNESCO, Paris, 1994. P. 119–122.
4. HolmHansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.
5. Krause G.H., Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics

// Annual review of plant biology. 1991. V. 42. № 1. P. 313–349.

6. Хорошева А.С., Баженова Е.С., Осадчиев А.А. и др. Водообмен между желобом Святой Анны и Новоземельским желобом // Труды XIII Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)": Сб. трудов конференции, Москва, 28 октября – 01 ноября 2024 г. Тверь: ООО "ПолиПРЕСС", 2025. С. 491–497.

7. Osadchiev A., Viting K., Frey D. et al. Structure and circulation of Atlantic water masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. 915674.

The productive activity of phytoplankton was studied in the eastern and northern parts of the Kara Sea during the summer period (July–August 2024). The specific primary production and photosynthetic efficiency of phytoplankton exhibited significant variability across areas with pronounced hydrophysical and hydrochemical zonality, which determines the diversity of conditions for primary production formation.

**Севастьянов В.С., Федулова В.Ю., Душенко Н.В.,  
Воропаев С.А., Наймушин С.Г., Долгоносов А.А.**

(Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва,  
e-mail: [ysev@geokhi.ru](mailto:ysev@geokhi.ru))

## **Газонасыщенность осадочного чехла депрессий Карского моря**

**Sevastyanov V.S., Fedulova V.Yu., Dushenko N.V.,  
Voropaev S.A., Naimushin C.G., Dolgonosov A.A.**

(Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow)

## **Gas saturation of the sedimentary cover of the Kara Sea depressions**

Ключевые слова: метан, CO<sub>2</sub>, морские осадки, депрессии, Карское море

Исследован газовый состав и концентрация углеводородных газов, серосодержащих соединений, CO<sub>2</sub> в вертикальном профиле осадочного чехла депрессий Карского моря. Основной закономерностью распределения концентрации CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> по вертикальному профилю колонок морских осадков является резкий рост концентраций газов с глубиной осадка, расположенного над газовой трубой. Низкие значения изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$  в осадках станций 7444, 8122 и 8123 свидетельствовали о притоке биогенного газа из многолетнемерзлых пород в осадочную толщу.

В настоящее время в результате потепления в Арктике разрушения многолетних пород и газогидратов возросло количество выбросов парниковых газов CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> в атмосферу [1]. Сейсмоакустическое зондирование осадочного чехла регистрирует многочисленные газонасыщенные осадки в Карском море, которые проявляются в виде «белых пятен» и «газовых труб» [2, 3] и располагаются вблизи разломных зон. Целью исследования являлось изучение распределения газов в морских осадках по глубине и выявление биогеохимических процессов, приводящих к неравномерности их вертикального распределения.

В ходе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2022 г. в юго-западной части Карского моря на дне палеодолины на глубине моря 225 м была отобрана колонка осадков (ст. 7444) (рис. 1). В ходе 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» на дне депрессии в центральной части Карского моря были отобрана колонка осадков в центральной части контурита (ст. 8122) и на краю контурита в области несогласия (ст. 8123) (рис. 2). Глубина депрессии достигала 296 м, максимальная ширина составляла 3.9 км. На разрезе в контуритовом дрефте выше кровли газовой трубы видны вертикальные зоны с потерей отражающих горизонтов, что свидетельствует о наличии газа в этих зонах и его миграции к поверхности дна.

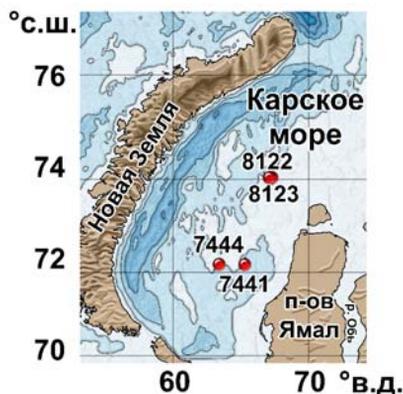


Рис. 1. Карта расположения станций пробоотбора.

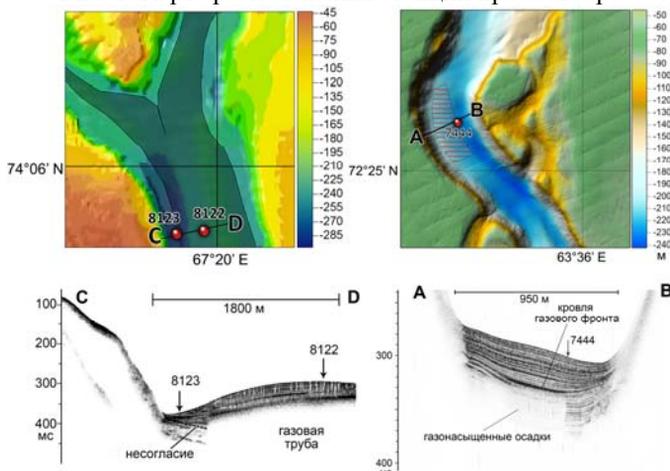


Рис. 2. Сейсмоакустический разрез контуритового дрефта в Карском море [4].

С помощью мультикорера и гравитационной трубы большого диаметра были отобраны колонки осадков, которые затем были поделены на горизонты толщиной 4 см. Газовые пробы из осадков выделяли в насыщенном соляном растворе в гелиевый пузырь и переносили в пенициллиновые флаконы, под солевой затвор, для дальнейшей транспортировки и проведения анализов в лаборатории ГЕОХИ РАН. Дегазация поровых газов из донных осадков объемом 300 мл производили на специальном комплексе дегазации. Бутылки с осадком помещали в ультразвуковую ванну на 20 мин для расщепления и перемешивания осадка, затем нагревали в сушильном шкафу до 50°C в течении 12 часов. Газовый состав и концентрацию выделенных газов определяли на газовом

хроматографе КристалЛюкс 4000М.

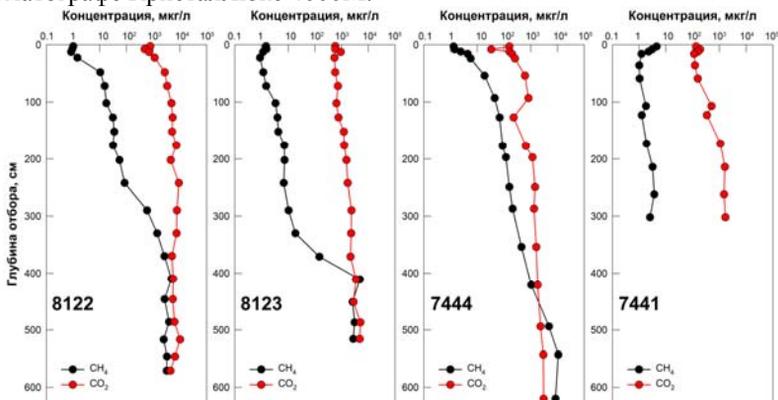


Рис. 3. Вертикальный профиль распределения  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в газонасыщенных слоях осадка.

По данным высокочастотного профилирования в днище долины расположения станций 7444, 8122 и 8123 были выявлены признаки газонасыщенности осадочных толщ в виде газовой «трубы».

Концентрация  $\text{CH}_4$  возрастала с увеличением глубины осадка ст. 7444 от 1.2 мкг/л в поверхностных слоях до максимального значения  $1.1 \times 10^4$  мкг/л на горизонте 543 см. При этом средняя концентрация  $\text{CH}_4$  в осадке ст. 7444 превышала среднюю концентрацию в осадке фоновой ст. 7441 в 700 раз. В осадке на ст. 7441 формирование газовой компоненты в осадке происходило за счет деградации ОВ и притока термогенных газов, а в осадке ст. 7444 в результате притока биогенного газа, по-видимому, в результате таяния многолетнемерзлых пород. Также колонка осадка 7444 характеризуется повышенным содержанием водорода и диметилсульфида, связанные с процессами сульфат-редукции. На глубине осадка (492–496 см) колонки 7444 находилось повышенное содержание этилена и этана.

Максимальная концентрация  $\text{CH}_4$  в осадках станций 8122, 8123 превышала концентрацию в осадках фоновых станций примерно в 1000 раз. На этих станциях морские осадки были пересыщены газами, что приводило к образованию газовых пузырей на поверхности вскрытых проб. В осадках станций 8122, 8123 концентрация  $\text{CH}_4$  плавно повышалась и достигала максимального уровня  $3.2 \times 10^3$  мкг/л и  $2.7 \times 10^3$  мкг/л, соответственно. Изотопный состав углерода метана  $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$  в осадке ст. 8122 и ст. 8123 свидетельствовал о притоке биогенного газа из многолетнемерзлых пород.

Коэффициент детерминации  $R^2$  между концентрациями  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  для осадка ст. 7444 от 0 до 620 см составлял 0.84, для осадка ст. 8122 от 0 до 174 см  $R^2=0.87$  и для осадка ст. 8123 от 0 до 300 см  $R^2=0.84$ . Это означает, что в перечисленных горизонтах осадка основным субстратом образования

CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> служить ацетат и метанол, образующиеся при деструкции пектина и лигноцеллюлозы, входящих в состав клеточных стенок водорослей и растений.

Необычное поведение  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  с глубиной осадка в области несогласия наблюдалось для ст. 8123. Сначала от 0 см до горизонта 152 см величина  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  практически не изменялась и составляла среднюю величину  $-19\%$ , затем резкое падение до величины  $-51.2\%$  на горизонте 371 см и плавный подъем  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  до  $-39.7\%$  на горизонте 516 см. В осадке ст. 8122 наоборот происходило плавное понижение величины  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  от  $-18.2\%$  для поверхностного горизонта до  $-27.0\%$  для горизонта 446 см. Таким образом, по изменению изотопного состава углерода CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> можно судить о диагенезе, происходящем в различных местах исследуемого контурита.

Таким образом, было показано, что распределение газов в донных осадках неоднородно и, в основном, связано с биогенными процессами, происходящими в осадке. По совокупности геохимических характеристик можно судить о диагенетических процессах, происходящих в газонасыщенных морских осадках.

Авторы признательны руководителю арктической экспедиции рейса № 96 на НИС «Академик Мстислав Келдыш М.Д. Кравчишиной за помощь и поддержку при проведении экспедиционных исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00334.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic Shelf // *J. Marine Syst.* 2007. V. 66. P. 227–243.
2. Slomnyuk S.V., Baranov B.V., Novichkova E.A. et al. Shallow-Water Contourite Drift Formation in the Kara Sea // *Oceanology.* 2025. V. 65. № 1. P. 139–149.
3. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д. и др. Проявление дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // *Докл. РАН. Науки о Земле.* 2021. Т. 400(2). С. 91–96.
4. Кравчишина М.Д. и участники рейса. Отчет 96 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Москва: ИО РАН, 2024. Т. 1. 629 с.

The gas composition and concentration of hydrocarbon gases, sulfur-containing compounds, and CO<sub>2</sub> in the vertical profile of the sedimentary cover of the Kara Sea depressions have been studied. The main pattern of the distribution of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations along the vertical profile of marine sediment columns is a sharp increase in gas concentrations with sediment depth located above the gas chimney. Low values of the carbon isotopic composition of methane  $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$  in sediments at stations 7444, 8122, and 8123 indicated an influx of biogenic gas from permafrost into the sedimentary strata.

**Семенов П.Б.<sup>1</sup>, Малышев С.А.<sup>1</sup>, Корнева Я.Ю.<sup>1</sup>,  
Шатрова Е.В.<sup>1</sup>, Киль А.О.<sup>1</sup>, Гусев Е.А.<sup>1</sup>, Фильчук К.В.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург; <sup>2</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург)

**Растворенное органическое вещество в водной толще и поровой воде донных осадков высокоширотной Арктики (по материалам дрейфа СП 41)**

**Semenov P.B.<sup>1</sup>, Malyshev E.V.<sup>1</sup>, Korneva Y.Yu.<sup>1</sup>,  
Shatrova E.V.<sup>1</sup>, Kil A.O.<sup>1</sup>, Gusev E.A.<sup>1</sup>, Filchuk K.V.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>FSE "Academician I.S. Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean", St. Petersburg, <sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg)

**Dissolved organic matter in the water column and pore water of bottom sediments in high-latitude Arctic (On the data of North-Pole-41)**

Ключевые слова: растворенное органическое вещество, углерод, Арктический океан, флуориметрия, донные осадки.

В работе задействована уникальная коллекция, представленная 894 спектрами флуоресценции РОВ, полученными из проб фильтратов (0.45 мкм) водной толщи и поровой воды донных осадков непосредственно на борту судна в ходе дрейфа ЛСП «Северный Полюс» в 2022–2023 гг. (СП-41). Измерения производились на спектрофлуориметре Shimadzu 5301 PC с применением ПО Panorama 3.0. Создана обширная база данных по флуоресцентному РОВ (ФРОВ), включающая значения традиционных биогеохимических спектральных индексов (FI, NIX, VIX) и концентрации групповых/индивидуальных флуорофоров выделенных по результатам ПАРАФАК в рамановских единицах (R.U). Модель, включающая 6 компонентов (флуорофоров), успешно прошла валидацию методом половинного расщепления (split half validation) в ходе обработки данных с использованием платформы Matlab. Все валидированные компоненты ФРОВ обнаруживают подтвержденное значениями коэффициентов конгруэнтности Таккера (mTCC > 0.95) сходство с флуорофорами, описанными ранее в литературе и включенными в базу Open Fluor.

Растворенное органическое вещество (РОВ) гидросферы образует огромный резервуар лабильного углерода, который играет ключевую роль в глобальном цикле этого элемента, во многом определяя концентрацию углеродсодержащих парниковых газов в атмосфере, непосредственно влияющую на тепловой баланс планеты. Трансформация РОВ и цикле углерода в Арктическом океане представляет огромный интерес и нуждается в интенсивном изучении. В особенности это касается наименее

изученных высокоширотных акваторий, стабильно покрытых морскими льдами, где действуют особые условия продукции, аккумуляции и транспорта РОВ. Одним из широко используемых подходов к изучению химической неоднородности РОВ и его дифференциации на пулы разного происхождения и биохимической лабильности служит 3D матричная спектрофлуориметрия (ЕЕМ) с последующим анализом спектров при помощи параллельного факторного анализа (PARAFAC, ПАРАФАК) В этой работе задействована уникальная коллекция, представленная 894 спектрами флуоресценции РОВ, полученными из проб фильтратов (0.45 мкм) водной тощи и поровой воды донных осадков непосредственно на борту судна в ходе дрейфа ЛСП «Северный Полюс» в 2022–2023 гг. (СП-41). Измерения производились на спектрофлуориметре Shimadzu 5301 PC с применением ПО RanoGama 3.0. На основе упомянутой коллекции спектров была создана обширная база данных по флуоресцентному РОВ (ФРОВ), включающая значения традиционных биогеохимических спектральных индексов (FI, NIX, VIX) и концентрации групповых/индивидуальных флуорофоров выделенных по результатам ПАРАФАК в рамановских единицах (R.U). Модель, включающая 6 компонентов (флуорофоров) успешно прошла валидацию методом половинного расщепления (split half validation) в ходе обработки данных с использованием платформы Matlab. Все валидированные компоненты ФРОВ обнаруживают подтвержденное значениями коэффициентов конгруэнтности Таккера ( $mTCC > 0.95$ ) сходство с флуорофорами, описанными ранее в литературе и включенными в базу Open Fluor. Флуорофоры C1–C4 по спектральным характеристикам можно отнести к РОВ гуминовой природы, эти компоненты могут иметь как автохтонное, так и аллохтонное происхождение. Компоненты C5 и C6 маркируют автохтонное РОВ белковой и аминокислотной природы, связанное с биологической продукцией в водной толще. Полученные данные представляют собой перспективный инструментарий для биогеохимических и океанографических исследований опробованных акваторий высокоширотной Арктики. Пространственное распределение компонентов (флуорофоров) в водной толще может трассировать различные источники РОВ, связанные как с локальной продукцией, так и с латеральной миграцией водных масс. Сопоставление данных по ФРОВ с результатами измерений растворенного органического углерода (РОУ), хлорофилла, растворенного кислорода и других ключевых гидрохимических и биогеохимических показателей обеспечит возможность достоверных и глубоких интерпретаций, связанных с продукцией и транспортом РОВ в водах высокоширотной Арктики. Вертикальная динамика состава ФРОВ в поровой воде донных осадков позволит в дальнейших исследованиях охарактеризовать особенности диагенеза и зафиксировать миграционные процессы в приповерхностных осадках.

Dissolved organic matter in water column and pore water of bottom sediments of the high-latitude Arctic (On the data of North-Pole-2022-2023). One of the widely used approaches to study the chemical heterogeneity of dissolved organic matter (DOM) and its differentiation into pools of different origin and biochemical lability is 3D matrix spectrofluorimetry with subsequent analysis of spectral matrices by parallel factor analysis (EEM-PARAFAC), this The work involved a unique collection represented by 894 ROV fluorescence spectra obtained from samples of filtrates (0.45  $\mu\text{m}$ ) of water body and porewater of bottom sediments directly on board the ice-resistant platform "North Pole" in 2022-2042-2022. Based on the aforementioned collection of spectra, an extensive fluorescent DOM (FDOM) database was collected, including values of traditional biogeochemical spectral indices (FI, HIX, BIX) and concentrations of group/individual fluorophores identified by PARAPH results in Raman units (R.U). The obtained data represent a promising toolkit for biogeochemical and oceanographic studies of sampled waters of the high-latitude Arctic

**Силкин В.А., Паутова Л.А., Кравчишина М.Д.,  
Клювиткин А.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [silkin.va@ocean.ru](mailto:silkin.va@ocean.ru))

## **Биологический углеродный насос высокой Арктики в летний период**

**Silkin V.A., Pautova L.A., Kravchishina M.D., Klyuvitkin A.A.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Biological carbon pump in the High Arctic summer**

Ключевые слова: фитопланктон, диатомовые, динофлагелляты, прикромочная зона

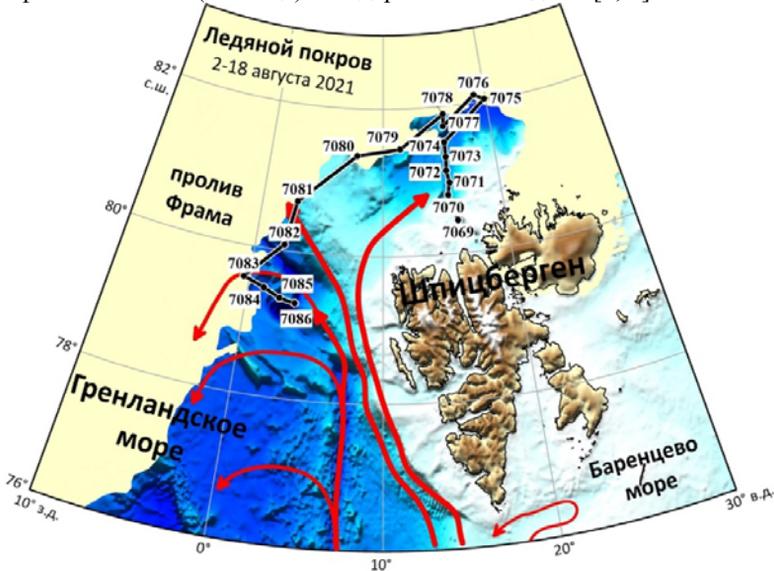
Исследована структура биологического углеродного насоса (БУН) в прикромочной ледовой зоне и на открытой воде глубоководного района высокой Арктики (пролив Фрама–котловина Нансена вплоть до 82° с.ш.) летом 2021 г. на основе данных 84-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». В арктических водах доминируют крупные динофлагелляты и инфузории, а миксопланктонная трофическая стратегия играет основную роль. БУН представляет собой систему трансформации органического вещества (ОВ), полученного в результате подледного цветения. На границе контакта арктических и атлантических вод в пределах эвфотической зоны крупные диатомовые водоросли определяют биомассу фитопланктона, вследствие чего БУН функционирует как система с высоким экспортом.

Мировой океан поглощает примерно половину атмосферной углекислоты, являясь мощным регулятором климата планеты [1]. Это происходит благодаря функционированию биологического углеродного насоса (БУН) океана, который переносит преобразованный в реакциях фотосинтеза атмосферный углерод в глубокие слои океана. В зависимости от продуктов реакции фотосинтеза в БУН, это может быть ОВ или неорганическое вещество (кальцит), поэтому выделяют органический и карбонатный насосы. Считается [2], что основной вклад в работу органического насоса вносят диатомовые водоросли, а карбонатного – кокколитофориды. Структура БУН определяет интенсивность экспорта углерода за пределы эвфотической зоны, и она подвержена влиянию климатических изменений. Наиболее существенное проявление климатических изменений наблюдается в Арктике, и оно связано с сокращением площадей ледяного покрова и смещением ледовой кромки на север. Ввиду логистических проблем состояние морской экосистемы во время перехода к открытой воде остается слабо изученным и, как следствие, существуют неопределенности в структуре и функционировании БУН.

В настоящем исследовании на основе количественных характеристик фитопланктона изучена структура БУН в зоне ледовой кромки и на открытой воде в западной части Евразийской Арктики.

**Материалы и методы.** В августе 2021 г. в 84-м рейсе НИС «Академик

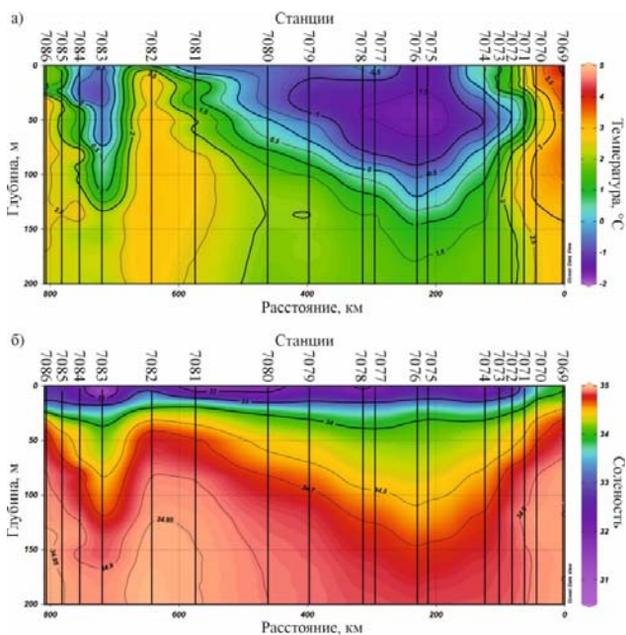
Мстислав Келдыш» по экспедиционной программе «Европейская Арктика: геологическая летопись изменений окружающей среды и климата» проводилось СТД-зондирование от поверхности до дна на 18-и станциях (7069–7086) в проливе Фрама и севернее вплоть до ледовой кромки южной периферии котловины Нансена (рис. 1). На борту определялись концентрации кремния, фосфатов, нитратов, нитритов и аммония; отбирались пробы на фитопланктон (численность и биомасса). Изучено 86 проб фитопланктона (таблица) стандартными методами [3, 4].



**Рис. 1.** Картосхема станций отбора проб, 2021 г: станции – черные кружки и номера рядом; черные линии – маршрут судна; красные стрелки – поступление теплой атлантической воды. Батиметрическая основа GEBCO.

**Факторы среды.** Двухслойная гидрофизическая структура водного столба характерна для всех станций за исключением 7069, 7070, 7071, где обнаружена только атлантическая вода (АВ) (рис. 2). На всех остальных станциях на поверхности фиксировалась арктическая вода (АркВ), а глубже – АВ. Дискрипторами для разделения водных масс являются температура и соленость: при  $t > 0^{\circ}\text{C}$  и солености  $> 34.7$  доминирует АВ, при  $t < 0^{\circ}\text{C}$  и солености  $34.2\text{--}34.7$  – АркВ [5].

Концентрации кремния в АВ значительно ниже по сравнению с АркВ: 1.83 и 0.69 мкМ соответственно,  $p < 0.05$ . Концентрация азота минерального в АВ, наоборот, существенно выше, чем в АркВ: 1.58 и 0.52 мкМ соответственно,  $p < 0.05$ . Поэтому АВ является кремний-лимитированной, а АркВ – азот-лимитированной [4, 6].



**Рис. 2.** Вертикальное распределение температуры и солёности воды летом 2021 г.

Таблица 1. Доминирующие виды фитопланктона и их показатели: максимальные численность, биомасса и вклад в общую биомассу, а также объем клеток ( $W_{cell}$ )

Станция	Горизонт, м	Доминирующий вид	Численность, кл/л	Биомасса, мг·м <sup>-3</sup>	$W_{cell}$ , мкм <sup>3</sup>	Вклад, %
Диатомовые						
7082	34	<i>Rhizosolenia styliformis</i>	2300	535.3	247360	89.3
7081	35	<i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>hebetata</i>	14500	145.4	10000	83.0
7070	35	<i>Thalassiosira rotula</i>	36400	170.9	4700	86.7
Золотистые						
7081	35	<i>Phaeocystis pouchetii</i>	727300	196.4	270	52.2
Инфузории						
7075	4	<i>Mesodinium rubrum</i>	58200	324.6	5580	99.3
Динофлагелляты						
7069	1	<i>Gyrodinium lachryma</i>	380	304.0	795800	87.1

**Доминирующие виды.** Диатомовые водоросли располагались значительно глубже (средняя глубина 26.8 м), чем динофлагелляты (8.6 м,  $p < 0.05$ ). Среди динофлагеллят доминирующим видом была *Gyrodinium lachryma*, которая демонстрировала максимальную биомассу и соответственно максимальный вклад в общую биомассу фитопланктона на ст. 7069 на поверхности воды (таблица).

Биомассы крупных диатомовых водорослей *Rhizosolenia styliiformis* ( $535.28 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) и *Rhizosolenia hebetata* f. *hebetata*, ( $145.45 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) отмечены на глубинах 34–35 м, где АВ контактирует с АркВ. На такой же глубине зафиксирована относительно высокая биомасса *Thalassiosira rotula*.

Таким образом, основной вклад в исследуемом районе вносят крупные диатомовые водоросли, а не мелкоклеточные виды весеннего цветения [7–9]. Вид весеннего цветения *Phaeocystis pouchetii* интенсивно рос только на ст. 7081. Инфузории демонстрировали рост на станциях, где АВ располагались глубже эвфотической зоны.

**Основные драйверы БУН.** Биомасса диатомовых в эвфотическом слое определяется концентрацией минерального азота в среде ( $r = 0.44$ ,  $p = 0.0056$ ). Эффективное функционирование органического насоса происходит на границе контакта АркВ и АВ, если АВ проникает в эвфотическую зону. Если АВ заглубляется, то растут инфузории и БУН функционирует как трансформатор существующего ОВ, полученного в результате подледного цветения [10]. Биомасса динофлагеллят зависела от биомассы мелких флагеллят ( $r = 0.33$ ,  $p = 0.002$ ) и, следовательно, в верхних горизонтах работает миксопланктонная пищевая цепь, сочетающая фототрофию и фаготрофию [11, 12]. Инфузория *Mesodinium rubrum* – специализированный миксотроф – получает пластиды от криптофитовых видов фитопланктона.

Таким образом, на границе ледовой кромки интенсивно растут крупные диатомовые водоросли, которые обладают более высоким экспортным потенциалом, чем мелкоклеточные виды фитопланктона. Смещение ледовой кромки в северном направлении приведет к преимущественному функционированию БУН именно с такой структурой.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН». Авторы благодарят экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш», а также А.С. Щуку и И.А. Замятина за данные STD-зондирований.

Исследование выполнено в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0027.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Falkowski P. Ocean Science: the power of plankton // Nature. 2012. V. 483. P. S17–S20.

2. Boyd P.W., Claustre H., Levy M. et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean // *Nature*. 2019. V. 568. P. 327–335.
3. Pautova L., Silkin V., Kravchishina M. et al. Phytoplankton of the high-latitude Arctic: intensive growth large diatoms *Porosira glacialis* in the Nansen Basin // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. V. 11. P. 453.
4. Pautova L., Kravchishina M., Silkin V. et al. The influence of the Atlantic Water Boundary Current on the phytoplankton composition and biomass in the Northern Barents Sea and the adjacent Nansen Basin // *J. Mar. Sci. Eng.* 2024. V. 12. P. 1678.
5. Pfirman S.L., Bauch D., Gammelsrød T. The Northern Barents Sea: Water Mass Distribution and Modification. 1994. P. 77–94.
6. Flores H., David C., Ehrlich J. et al. Sea-ice properties and nutrient concentration as drivers of the taxonomic and trophic structure of high-Arctic protist and metazoan communities // *Polar Biology*. 2019. V. 42. P. 1377–1395.
7. von Quillfeldt C.H. Common diatom species in Arctic spring blooms: their distribution and abundance // *Bot. Mar.* 2000. V. 43. P. 499–515.
8. Rat'kova T.N., Wassmann P. Seasonal variation and spatial distribution of phyto- and protozooplankton in the central Barents Sea // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 38. P. 47–75.
9. Макаревич П.Р., Дружкова Е.И., Ларионов В.В. Пелагические альгоценозы Баренцева моря в области ледовой кромки в весенний период // *Журнал общей биологии*. 2025. Т. 86. № 1. С. 48–62.
10. Ardyna M., Mundy C.J., Mayot N. et al. Under-Ice phytoplankton blooms: shedding light on the “Invisible” part of Arctic primary production // *Front. Mar. Sci.* 2020. V. 7. P. 608032.
11. Flynn K.J., Mitra A., Anestis K. et al. Mixotrophic protists and a new paradigm for marine ecology where does plankton research go now? // *Journal of Plankton Research*. 2019. V. 41. P. 375–391
12. Stoecker D.K., Lavrentyev P.J. Mixotrophic Plankton in the polar seas: a Pan-Arctic review // *Front. Mar. Sci.* 2018. V. 5. P. 292.

The structure of the biological carbon pump in the marginal ice zone and open water of the deep-water region of the High Arctic (Fram Strait–Nansen Basin up to 82° N) was studied in summer 2021 using data from 84<sup>th</sup> cruise of the RV *Akademik Mstislav Keldysh*. Large dinoflagellates and ciliates dominate Arctic waters, with a mixoplanktonic trophic strategy playing a key role. The biological carbon pump is a system for transforming organic matter produced by under-ice blooms. At the interface between Arctic and Atlantic waters within the euphotic zone, large diatoms determine phytoplankton biomass, resulting in the biological carbon pump functioning as a highly exporting system.

**Сорокина В.В., Кулыгин В.В., Алешина Е.Г.**

(Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, e-mail: v.sorok@mail.ru)

**Оценка параметров карбонатной системы вод на участке нижний Дон – восточная часть Таганрогского залива в 2024 г.**

**Sorokina V.V., Kulygin V.V., Alyoshina E.G.**

(Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don)

**Assessment of the carbonate system parameters in the lower Don and the eastern part of the Taganrog Bay in 2024**

Ключевые слова: растворенный неорганический углерод, pH, щелочность, степень насыщенности вод по отношению к кальциту, парциальное давление  $\text{CO}_2$ , устьевая область Дона

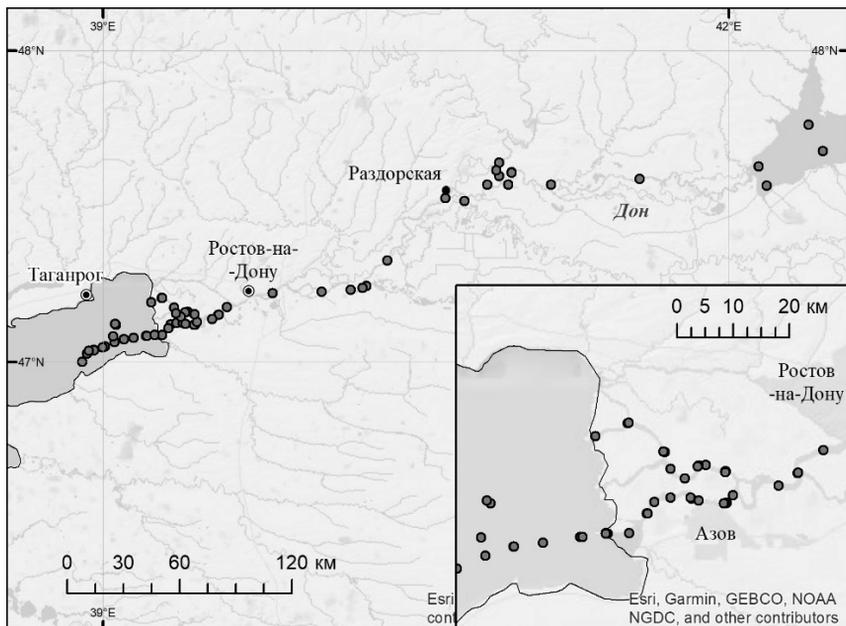
Выполнена оценка параметров карбонатной системы вод устьевой области Дона расчетным методом на основе данных экспедиционных исследований (апрель – август 2024 г.) Значения парциального давления  $\text{CO}_2$  в речных водах были значительно выше атмосферных; в восточной части Таганрогского залива, в большинстве случаев, – ниже атмосферных.

Исследование карбонатной системы природных вод, как составляющей биогеохимического цикла углерода, актуально для понимания процессов функционирования экосистем, динамики и механизмов их изменений под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Современных оценок содержания неорганического углерода (DIC), концентрации  $\text{CO}_2$  и его парциального давления ( $p\text{CO}_2$ ) в водах нижнего Дона, Кубани, а также в Азовском море в литературе обнаружить не удалось. В 2024 г. в Южном научном центре Российской академии наук (ЮНЦ РАН) начаты исследования параметров системы неорганического углерода речных и морских вод юга европейской части России.

Целью настоящей работы является расчет и анализ параметров карбонатной системы в водном континууме нижний Дон – Таганрогский залив на основе данных экспедиционных исследований.

В период с апреля по август 2024 г. (8 рейсов, НИС «Профессор Панов») на участке, включающем западную часть Цимлянского водохранилища, нижний Дон и восточная часть Таганрогского залива выполнены измерения гидролого-гидрохимических величин на 106 станциях (рис. 1). Дельта Дона в наибольшей степени была охвачена наблюдениями (всего 63 станций). На нижнем Дону (исключая дельту) исследования проведены в апреле и июле (22 станций), в западной части Цимлянского водохранилища – только в середине июля (4 станции), в восточной части Таганрогского залива – в апреле, июне и июле (17 станций).



**Рис. 1.** Схема расположения станций экспедиционных исследований в апреле – августе 2024 г.

В отобранных образцах воды определяли *in situ* pH (шкала NBS) (рН-метр HI98128 фирмы Hanna) и концентрацию кислорода. Для определения Alk и ионного состава пробы воды отбирали с горизонта 0–0.5 м, помещали в пластиковые бутылки, заполненные полностью, и плотно закрывали. Определение щелочности проводилось объемным ацидиметрическим методом в междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону) после возвращения НИС из рейса; расхождение результатов титрования составило  $\pm 0.15\%$ . На каждой станции проводили зондирование профиля температуры, электропроводности и давления.

Расчет параметров карбонатной системы вод выполняли с использованием программы PyCO2SYS [1], двух наборов параметров констант равновесия для моделирования диссоциации угольной кислоты:

- 8: M79 ( $0 < T < 50$  °C,  $S = 0$ , для пресной воды) [2];

- 9: CW98 ( $2 < T < 30$  °C,  $0 < S < 40$ , шкала NBS, реальная морская вода в устье реки) [3];

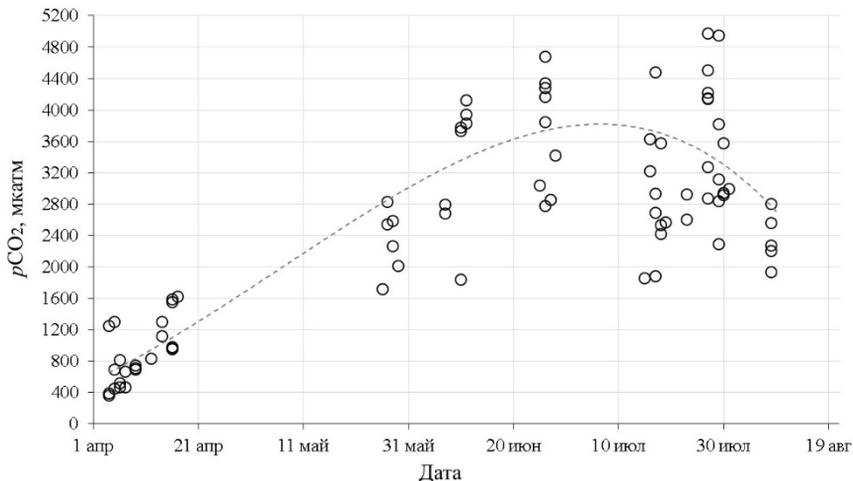
В качестве входных данных использовали измеренные значения pH и Alk, а также температуры, солёности, давления, концентрации сульфат-иона, иона кальция, остальные параметры карбонатной системы (концентрации DIC и CO<sub>2</sub>, pCO<sub>2</sub>, степень насыщения вод по отношению к кальциу ( $\Omega_c$ )) рассчитывали (таблица).

Таблица. Гидролого-гидрохимические характеристики вод в апреле–августе 2024 г.

Характеристика		среднее	медиана	$\sigma$	минимум	максимум
Дельта Дона						
Измеренные параметры	T воды, $^{\circ}\text{C}$	23,2	25,6	5,0	12,0	28,5
	S воды, psu	0,60	0,59	0,08	0,52	0,77
	pH (NBS)	7,99	7,95	0,24	7,58	8,60
	Alk, мкмоль/кг	3919	3889	322	3369	4770
	$\text{SO}_4^{2-}$ , мкмоль/кг	3209	3207	514	2406	4401
	$\text{Ca}^{2+}$ , мкмоль/кг	2027	2005	337	1504	2701
Рассчитанные параметры (8 алгоритм для пресных вод)	DIC, мкмоль/кг	4021	3988	326	3376	4935
	$\text{CO}_3^{2-}$ , мкмоль/кг	19	16	10	7	46
	$\text{HCO}_3^-$ , мкмоль/кг	3901	3849	316	3308	4770
	$\text{CO}_2$ , мкмоль/кг	101	97	43	23	239
	p $\text{CO}_2$ , мкратм	2949	2852	1425	464	7222
	$\Omega\text{c}$	12	9	7	4	31
Нижнее течение Дона (без дельты)						
Измеренные параметры	T воды, $^{\circ}\text{C}$	19,8	27,3	8,8	7,3	28,4
	S воды, psu	0,53	0,50	0,14	0,37	0,89
	pH (NBS)	8,19	8,00	0,36	7,61	8,70
	Alk, мкмоль/кг	3563	3530	331	2959	4439
	$\text{SO}_4^{2-}$ , мкмоль/кг	2715	2607	906	1500	5199
	$\text{Ca}^{2+}$ , мкмоль/кг	1838	1705	472	1200	3300
Рассчитанные параметры (8 алгоритм для пресных вод)	DIC, мкмоль/кг	3622	3641	346	2947	4467
	$\text{CO}_3^{2-}$ , мкмоль/кг	26	18	15	7	54
	$\text{HCO}_3^-$ , мкмоль/кг	3524	3530	334	2890	4377
	$\text{CO}_2$ , мкмоль/кг	72	77	49	19	192
	p $\text{CO}_2$ , мкратм	2094	2421	1687	361	5990
	$\Omega\text{c}$	14	10	9	4	31
Восточная часть Таганрогского залива						
Измеренные параметры	T воды, $^{\circ}\text{C}$	23,1	25,3	4,1	17,4	29,0
	S воды, psu	2,25	1,91	1,58	0,50	6,18
	pH (NBS)	8,72	8,70	0,13	8,43	8,96
	Alk, мкмоль/кг	3585	3596	266	3119	4156
	$\text{SO}_4^{2-}$ , мкмоль/кг	6176	6000	2722	2606	12489
	$\text{Ca}^{2+}$ , мкмоль/кг	2238	2301	605	1403	3597
Рассчитанные параметры (9 алгоритм для эстуарных вод)	DIC, мкмоль/кг	3387	3412	301	2796	3917
	$\text{CO}_3^{2-}$ , мкмоль/кг	197	185	65	127	371
	$\text{HCO}_3^-$ , мкмоль/кг	3179	3220	337	2489	3682
	$\text{CO}_2$ , мкмоль/кг	12	12	4	5	20
	p $\text{CO}_2$ , мкратм	341	320	136	143	675
	$\Omega\text{c}$	20	19	4	13	26

В результате выполненных расчетов установлены средние уровни содержания DIC, CO<sub>2</sub>, а также *p*CO<sub>2</sub> и Ωс для вод нижнего Дона и восточной части Таганрогского. Значения парциального давления CO<sub>2</sub> в исследуемых речных водах в большинстве случаев существенно превосходили значения атмосферного *p*CO<sub>2</sub> (современный уровень 420 мкатм), особенно в летнее время.

В водах нижнего Дона, включая дельту Дона, определена весенне-летняя динамика исследуемых параметров. Величина *p*CO<sub>2</sub> в речной воде достигала наибольших значений в июне–июле (в среднем 3600 мкатм), наименьших – в начале апреля (рис. 2).



**Рис. 2.** Сезонная динамика парциального давления CO<sub>2</sub> в водах нижнего Дона, включая дельту, в 2024 г.

Напротив, в восточной части Таганрогского залива в апреле и июле (двух периодах пикового развития фитопланктона) *p*CO<sub>2</sub> воды в поверхностном слое было меньше атмосферного (в среднем 411 мкатм).

Среди основных факторов, которые могут объяснить сезонные колебания *p*CO<sub>2</sub> в исследуемых водах: колебания температуры воды, фотосинтез, различные стоки и дренаж с суши и водно-болотных угодий, которые могут быть перенасыщены растворенным CO<sub>2</sub> образующимся в результате микробного и корневого дыхания. Так, для речных вод (нижний Дон) прослеживалась прямая связь между *p*CO<sub>2</sub> и температурой воды, а для вод Таганрогского залива такой связи не было, здесь основным фактором, влияющим на *p*CO<sub>2</sub>, являлся фотосинтез. В результате фотосинтеза повышалась концентрация растворенного кислорода в воде, pH и кальцита, вода становилась перенасыщенной кальцитом. Следует отметить, что в придонной воде Таганрогского залива *p*CO<sub>2</sub> всегда было более высоким,

концентрация кислорода, рН и степень насыщения кальцитом более низкими.

Таким образом, Таганрогский залив в апреле и июле функционировал как автотрофная система, что способствовало поглощению  $\text{CO}_2$  атмосферы. Воды Дона, как и большинства рек, являлись гетеротрофными (производство  $\text{CO}_2$  посредством дыхания превышало потребление  $\text{CO}_2$  в результате водной продукции), что создавало условия для эвазии  $\text{CO}_2$ .

Для лучшего понимания временной изменчивости и потенциальных «горячих точек» выбросов  $\text{CO}_2$ , необходимы исследования процессов, связанных с круговоротом  $\text{CO}_2$ , в разные сезоны и гидрологические периоды.

Авторы признательны сотрудникам ЮНЦ РАН Сазонову А.Д., Михалко А.С., Подобедовой А.В., Жерлицыной А.А. за проведение экспедиционных исследований и помощь в отборе проб.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 125040404857-4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Humphreys M.P., Lewis E.R., Sharp J.D., Pierrot D. PyCO2SYS v1.8: marine carbonate system calculations in Python. *Geoscientific Model Development*. 2022. V. 15. P. 15–43. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-15-2022>
2. Millero F.J. The thermodynamics of the carbonate system in seawater // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. P. 1651–1661. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90184-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90184-4).
3. Cai W.-J., Wang Y. The chemistry, fluxes, and sources of carbon dioxide in the estuarine waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia. // *Limnology and Oceanography*. 1998. V. 43. P. 657–668. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.4.0657>

The parameters of the carbonate system of the lower Don and the eastern part of the Taganrog Bay were assessed using a calculation method, based on field observation data (April–August 2024). The values of partial pressure of  $\text{CO}_2$  in river were significantly higher than atmospheric; in the eastern part of the Taganrog Bay, in most cases, they were lower than atmospheric.

**Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Дорохова Е.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: Alena.st@mail.ru)

## **Связь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков Карского моря**

**Streltsova E. A., Belyaev N. A., Dorokhova E.V.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Relationship between organic carbon content and grain size distribution of bottom sediments of the Kara Sea**

Ключевые слова: Карское море, органический углерод, гранулометрический состав.

С целью определения сорбционной поверхности осадков усовершенствована методика определения гранулометрического состава осадков. Совместно определено содержание органического углерода и гранулометрический состав в образцах поверхностного слоя донных осадков Карского моря. Рассчитана площадь сорбционной поверхности исследованных образцов. Проведен анализ зависимости содержания органического углерода от гранулометрического состава. Выявлена отличная корреляционная зависимость ( $R^2 > 0.93$ ) для 30% исследованных образцов, хорошая ( $R^2 > 0.8$ ) для 50%, наблюдаемая для 80% и полное ее отсутствие для оставшихся 20% осадков. Повышенные значения содержания органического углерода наблюдаются в эстуарных зонах Оби и особенно Енисея пониженные величины – вблизи побережья Новой и в пограничных зонах между шельфовой областью и центральным Арктическим бассейном.

О связи содержания донных осадков органического углерода с гранулометрическим составом осадков говорилось ранее неоднократно, в том числе и для осадков Арктических шельфовых морей [1]. При этом для Карского моря данные исследования ранее не проводились. Накопление органического углерода в осадках зависит от множества различных факторов и перед нами стояла задача выявить влияние гранулометрического состава на этот процесс.

Определение органического углерода методических трудностей не вызывает. Данные о его содержании, полученные разными методами, имеют хорошую сходимость. Определение гранулометрического состава имеет гораздо больше методических особенностей. В практике современных океанологических исследований содержание органического углерода сравнивалось или с медианным диаметром частиц [1], или же площадь сорбционной поверхности определялась по способам насыщения осадков азотом [2]. И тот и другой способ представляется авторами не полностью корректными. Медианный диаметр не всегда отражает реальное распределение частиц по размерам, так как в шельфовых осадках достаточно часто встречается многомодальное распределение различных

фракций, отражающее многообразие источников поступления минерального вещества в донные осадки. В то же время процесс пробоподготовки для определения площади сорбционной поверхности осадков с помощью насыщения азотом подразумевает прокаливание образцов для избавления от органики, что неизбежно приводит к изменению гранулометрического состава осадков. При этом также не учитывается площадь сорбционной поверхности детрита, который также может играть значительную роль.

Для решения данной проблемы была усовершенствована методика определения гранулометрического состава [3]. Суть данной методики заключается в минимальной трансформации исходных образцов при первичном определении гранулометрического состава. Анализ гранулометрического состава проводился методом лазерной дифракции с предварительным мокрым ситованием образцов, органического углерода - методом каталитического сжигания образца в токе воздуха на анализаторе Shimadzu TOC-VCPH. Результаты анализа гранулометрического состава были подвергнуты математической обработке для расчета площади сорбционной поверхности и выделения отдельных модальных фракций. Базой для исследования послужила коллекция поверхностного слоя донных осадков, собранная в процессе многолетних исследований Карского моря по программе "Экосистемы морей Восточной Арктики". Точки отбора образцов представлены на карте (рис. 1).

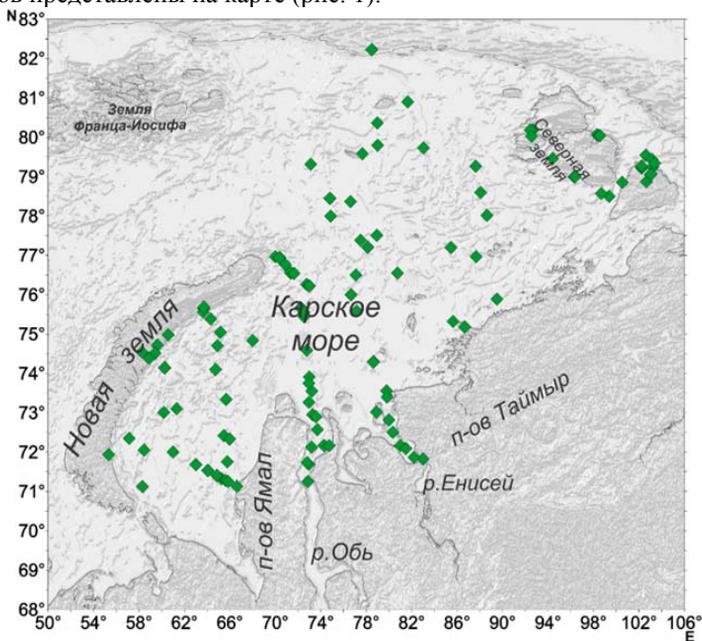
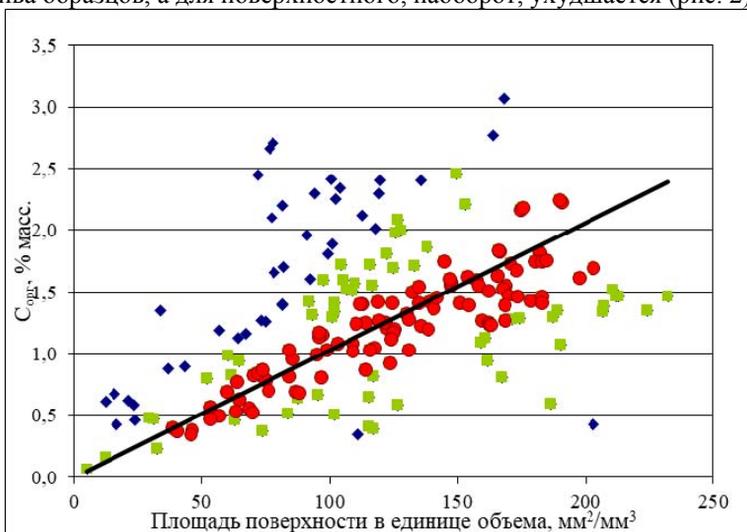


Рис. 1. Расположение станций пробоотбора.

Первичный статистический анализ полученных результатов не показал прямой связи содержания органического углерода с гранулометрическим составом осадков при общем визуально наблюдаемом тренде. Для выяснения наличия или отсутствия предполагаемой связи были разработаны и применены методы групповой статистической обработки, позволяющие выявить наличие корреляционной зависимости для отдельных групп станций.

Применение данного метода позволило выявить отличную корреляционную зависимость  $R^2 > 0.93$  для 30% исследованных образцов, хорошую ( $R^2 > 0.8$ ) для 50%, наблюдаемую для 80% и полное ее отсутствие для оставшихся 20% осадков. При этом для подстилающего горизонта осадков корреляционная зависимость улучшается относительно всего массива образцов, а для поверхностного, наоборот, ухудшается (рис. 2).



**Рис. 2.** Взаимосвязь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков Карского моря.

Отклонение относительно тренда фиксируется как в сторону увеличения содержания органического углерода относительно теоретически рассчитанных величин, так и в сторону их уменьшения. Повышенные значения содержания органического углерода наблюдаются в эстуарных зонах Оби и особенно Енисея, где происходит лавинная седиментация поступающего с речным стоком взвешенного вещества [4, 5], пониженные величины – вблизи побережья Новой Земли (где происходит разгрузка минеральной фракции с ледниковым стоком) и в пограничных зонах между шельфовой областью и центральным Арктическим бассейном. Прослеженные зависимости подтверждаются изменением модального

распределения при изменении содержания органического углерода.

Таким образом, было показано, что гранулометрический состав осадков является определяющим фактором распределения концентрации в них органического вещества для большинства исследованных акваторий Карского моря. А отклонение от данной зависимости показывает влияние поступления в осадки минеральной фракции другого происхождения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stein R., Macdonald R.W. Organic Carbon in Arctic Ocean Sediments: A General Introduction // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 83–199.
2. Lawrence M. Mayer Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1994. V. 58. № 4. P. 1271–1284.
3. Стрельцова Е.А., Беляев Н.А., Дорохова Е.В. Оптимизация методики определения гранулометрического состава донных осадков методом лазерной дифракции // *Океанология*. 2026. (в печати).
4. Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
5. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

In order to determine the sorption surface of sediments, the technique for determining the granulometric composition of sediments was improved. The organic carbon content and granulometric composition were determined jointly in samples of the surface layer of bottom sediments of the Kara Sea. The area of the sorption surface of the studied samples was calculated. The dependence of the organic carbon content on the granulometric composition was analyzed. An excellent correlation dependence ( $R^2 > 0.93$ ) was revealed for 30% of the studied samples, a good one ( $R^2 > 0.8$ ) for 50%, observed for 80% and its complete absence for the remaining 20% of sediments. Increased values of organic carbon content are observed in the estuarine zones of the Ob and especially the Yenisei, lower values – near the coast of Novaya and in the border zones between the shelf area and the central Arctic Basin.

**Торопов А.С.<sup>1,2</sup>, Слукровский З.И.<sup>2</sup>, Строганов Н.А.<sup>1</sup>,  
Денисов Д.Б.<sup>2</sup>, Адамская П.Н.<sup>2,3</sup>**

(<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: [torop990@gmail.com](mailto:torop990@gmail.com); <sup>2</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты; <sup>3</sup> Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты)

**Ранний диагенез в стратифицированном водоеме:  
поведение редких и рассеянных элементов в градиенте  
окислительно-восстановительных условий (на примере оз.  
Могильное, о-в Кильдин, Мурманская область)**

**Toropov A.S.<sup>1,2</sup>, Slukovskii Z.I.<sup>2</sup>, Stroganov N.A.<sup>1</sup>,  
Denisov D.B.<sup>2</sup>, Adamskaya P.N.<sup>2,3</sup>**

(<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>2</sup>Institute of the North Industrial Ecology Problems of Kola Science Center of RAS, Apatity; <sup>3</sup>Apatity branch of Murmansk Arctic University)

**Early diagenesis in a stratified basin: rare and trace element  
distribution across a redox gradient (Lake Mogilnoe, Kildin  
Island, Murmansk region)**

Ключевые слова: ранний диагенез, меромиксис, геохимия элементов, окислительно-восстановительные условия, геохимические барьеры

В водной толще озера Могильное изучены процессы раннего диагенеза и перераспределения более 60 элементов. Водоем представляет собой контрастную динамичную геохимическую систему, где в реальном времени протекают активные диагенетические процессы, имеющие прямые аналоги в палеообстановках и современных стратифицированных бассейнах мира

Озеро Могильное, расположенное на острове Кильдин в Баренцевом море, является уникальным природным объектом Российской Арктики. Это одно из немногих высокоширотных меромиктических (слоистых) и анхиалиновых (имеющих подземную связь с морем) озёр. Это бывший морской залив, отделённый от моря каменной перемычкой около 1000–1500 лет назад [1, 2]. Уникальность водоема заключается в устойчивой вертикальной стратификации, формирующей чётко разделённые слои: верхний опреснённый (миксолимнион), промежуточный морской с нормальным кислородным режимом (хемоклин), «розовый слой», населённый аноксигенными фототрофами, и нижний анаэробный сероводородный слой (момимолимнион) [1, 3, 4].

История изучения озера насчитывает более ста лет, начиная с первых комплексных работ К.М. Дерюгина в начале XX века [5], многолетние наблюдения обобщены в фундаментальных монографиях, вышедших в 1925, 1975 и 2002 гг. [1, 5, 6], заложившие основу для понимания его

гидрологии и биологии. Начиная с 1970-х годов, исследователями отмечаются негативные тенденции в состоянии экосистемы озера, наблюдается осолонение поверхностного слоя, поднятие границы  $H_2S$  и росте его концентраций в придонных водах [1, 3, 7]. Современный этап исследований (2018–2019 гг.), проводившийся в рамках проекта РГО «Колыбельная трескового озера...», подтвердил усиление этих тенденций [3, 7]. Параллельно были получены новые данные о химическом загрязнении водоёма. Впервые в донных отложениях и почвах водосборной территории были обнаружены хлорорганические соединения, в том числе стойкие органические загрязнители [3, 8]. Компонентный состав этих соединений указывает на смешанные источники их поступления, включая как глобальный атмосферный перенос, так и локальное историческое загрязнение [3, 8]. Помимо гидрохимических и токсикологических исследований, продолжаются работы по изучению биологического разнообразия озера. [9].

В наших исследованиях это озеро рассмотрено как пример четко стратифицированного на четыре геохимические зоны соленого водоема, каждая из которых представляет собой «диагенетический реактор». На основе детального анализа распределения широкого спектра элементов, органического углерода и биогенов по глубине озера, наблюдались ключевые диагенетические процессы, формирование геохимических барьеров и оценено влияния редокс-условий на миграцию элементов.

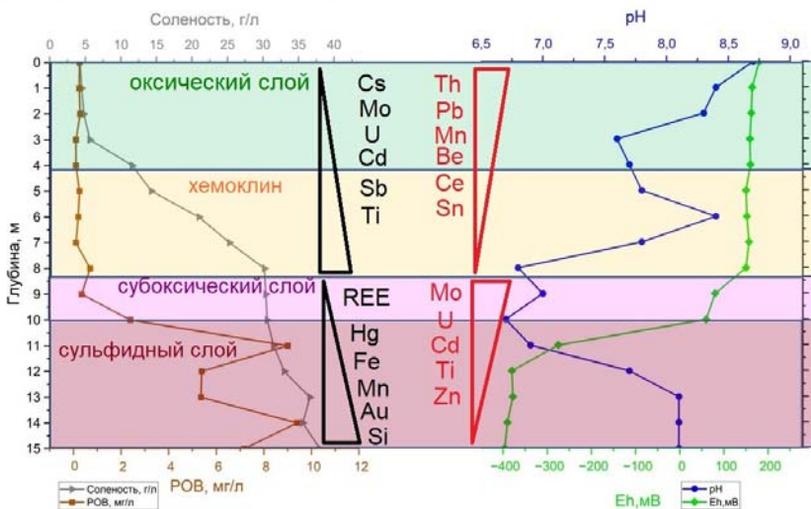
Озеро (рис. 1) было опробовано в июле 2025 г. Пробы отбирались в самой глубоководной части озера послойно через каждый метр ручным батометром с охватом глубин от 0 до 15 м (пробы M0-M15 соответственно). Содержание микроэлементов определяли масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой, основных ионов – ионообменной хроматографией, растворенный органический углерод ( $C_{org}$ ) – методом высокотемпературного каталитического окисления.



**Рис. 1.** Схема расположения района исследований.

Следует отметить чрезвычайно высокую сложность воды озера как аналитического объекта. Для получения достоверных данных с учетом субнанограммовых концентраций большинства микроэлементов в близких к морским водам, измерения проводилось с использованием системы онлайн-поддачи внутренних стандартов (Sc, Rh, In, Re) для коррекции нестабильности сигнала, матричных эффектов и дрейфа аналитического отклика. Для устранения спектральных интерференций, в т.ч. полиатомных ионов, генерируемых из компонентов плазмы (Ar), матрицы пробы (Cl, S, C) и атмосферы (O, N), анализ ряда элементов выполнялся в режиме реакционно-коллизийной ячейки с использованием гелия или водорода.

Среди широкого спектра элементов (более 60), по которым получены достоверные количественные значения рассмотрим самые информативные с точки зрения индикации процессов раннего диагенеза в строго стратифицированном водоеме (рис. 2).



**Рис. 2.** Тренды изменения состава воды оз. Могильное по глубине.

Классическая пара, иллюстрирующая редокс-стратификацию (Fe-Mn), показывает крайне низкие концентрации этих элементов в верхних окисисских слоях (M0–M3) – 20–30 мкг/л и ~3 мкг/л для Fe и Mn соответственно. В преданоксисческой зоне (M5–M7) начинается его восстановление до Fe(II), что приводит к росту концентраций до 46–56 мкг/л. Скорость восстановления Mn выше, чем Fe, это вызывает всплеск его концентрации почти на два порядка – до 74–88 мкг/л. Глубже, в сульфидной зоне (M11–M15), Mn(II) осаждается в виде сульфида (MnS), и его концентрация снова снижается, но остается повышенной (~113 мкг/л) по сравнению с поверхностью, что может указывать на непрерывный поток

восстановленного Mn из вышележащих слоев. Максимум растворенного Fe(II) наблюдается в верхней части анокисческой зоны (M8–M10), далее по глубине Fe падает (~90 мкг/л) из-за осаждения в виде пирита (FeS<sub>2</sub>) или гидротроилита (FeS).

Концентрации U, Mo и Cd растут в верхних окисических слоях практически прямо пропорционально повышению солёности по хемоклину, достигая кларковых значений для морских вод. Ниже по профилю, анокисческая сульфидная зона работает как ловушка с удалением Mo и Cd в виде сульфидов, а U и Ce – в форме оксидов в степени окисления +4.

Резкий скачок C<sub>орг</sub> в слоях M10-M15 до экстремальных значений (5.36–9.40 мг/л), сопровождаемый столь же резким ростом количеств фосфора и кремния (растворение диатомей) — прямое следствие анаэробного диагенеза, когда происходит массовая минерализация органического вещества гетеротрофными бактериями. Высокий C<sub>орг</sub> является ключевым фактором, влияющим на геохимию многих элементов: он выступает хелатирующим агентом для металлов (Cu, Zn, РЗЭ), источником энергии для бактерий и субстратом для сорбции. Самый нижний слой M-15 значительно обогащен Hg и Au, и менее контрастно, но достоверно обогащен диагенетически высвободившимися Li, Ni, Ge, W, Th.

Нормированные на хондрит спектры РЗЭ (рис. 3) подтверждают отличие химизма вод озера от открытого океана и отражают изменение условий комплексообразования и сорбции по глубине. Наиболее информативным показателем четкого градиента редокс-условий был тренд *Eu/Eu\** аномалии, меняясь от резко отрицательной до положительной с глубиной.

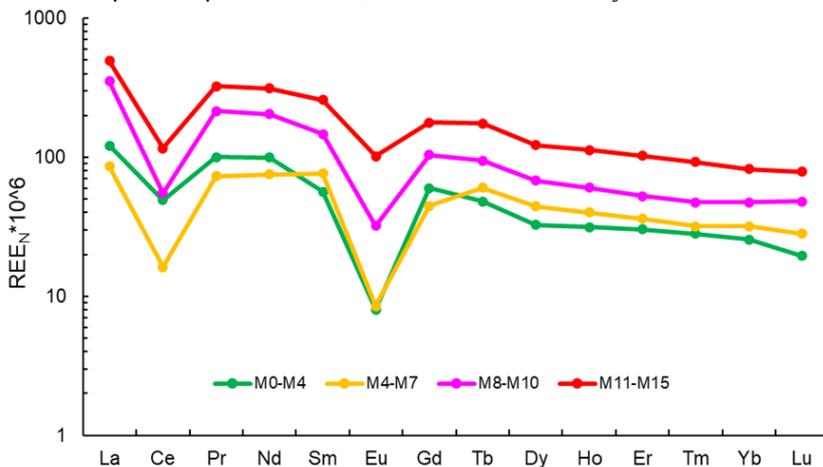


Рис. 3. Нормированные спектры РЗЭ воды оз. Могильное.

Таким образом, озеро Могильное представляет собой не только уникальный природный и биологический феномен, но и ценную природную

модель для изучения диагенетических процессов, аналоги которых в масштабах геологической истории формировали полезные ископаемые.

Исследования выполнены в рамках проекта РНФ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.
3. Strelkov P., Shunatova N., Fokin M. et al. Marine Lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea): One hundred years of solitude // *Polar Biology*. 2014. V. 37. P. 297–310.
4. Кокрятская Н.М., Лосюк Г.Н., Колпакова Е.С. и др. Современное состояние экосистемы анхиалинового меромиктического озера Могильное (о. Кильдин, Баренцево море) // *Океанология*. 2025. Т. 65. № 2. С. 264–279.
5. Краснова Е.Д., Василенко А.Н., Воронов Д.А. и др. Новые данные об озере Могильном (о. Кильдин, Баренцево море): результаты экспедиций 2018 года // Труды конф. «MARESEDU-2018». 2018. С. 145–149.
6. Дерюгин К.М. Реликтовое озеро Могильное (остров Кильдин в Баренцевом море) // Труды Петергофского естественно-научного института. 1925. № 2. 111 с.
7. Реликтовое озеро Могильное (исследования 1997–2000 гг.). – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. – 164 с.
8. Strelkov P., Stogov I., Krasnova E. et al. Rapid unpredicted changes in the stratification of marine lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea) through the early 21st century // *Polar Research*. – 2019. – V. 38. – 3394.
9. Kolpakova E.S., Velyamidova A.V., Koroleva T.A. Organochlorine compounds in the bottom sediments of the meromictic Mogilnoe Lake (Kildin Island, Russia) // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. № 4. P. 416-420.
10. Гогорев Р.М., Ланге Е.К. Новые данные по диатомовым озера Могильное (остров Кильдин, Баренцево море) // *Вопросы современной альгологии*. 2019. № 2 (20). С. 116–119.

Processes of early diagenesis and redistribution of more than 60 elements were studied in the water column of Lake Mogilnoe. The lake represents a contrasting and dynamic geochemical system where active diagenetic processes are occurring in real time. These processes have direct analogues in paleo-environments and modern stratified basins worldwide.

**Федоров Ю.А., Талпа Б.В., Гарькуша Д.Н., Доценко Н.В.**  
(Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: fedorov@sfedu.ru)

**Гидротроилит в донных отложениях водных экосистем**  
**Fedorov Yu.A.<sup>1</sup>, Talpa B.V., Gar'kusha D.N.<sup>1</sup>, Dotsenko N.V.<sup>1</sup>**  
(Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don)

**Hydrotroilite in bottom sediments of aquatic ecosystems**

Ключевые слова: гидротроилит, сероводород, пирит, грязи сульфидные, глобулы

С помощью комплекса методов (литолого-минералогического, электронно-микроскопического, химического, физико-химического, рентгенофазного) было исследовано распределение и форма миграции гидротроилита. Выполнена его идентификация и изучено поведение в раннем диагенезе донных отложений водных объектов. Однозначно установлено, что в пелоидах озер обнаружен гидротроилит – рентгеноаморфный минерал, немагнитный, коллоидный моносульфид железа.

В СССР, по-видимому, впервые гидротроилит был обнаружен и описан в минеральных сульфидных глинах оз. Большой Тамбукан. Под микроскопом известный исследователь минеральных вод и лечебных грязей В.В. Штильмарк в 1925 г. «...увидел глинистую массу, усеянную шариками гидротроилитными» [1, 9]. Н.М. Страхов [6], описывая гидротроилитовые прослои, считал, что их образование происходит в результате встречной миграции свободного  $H_2S$  сверху из древнечерноморских отложений и  $Fe^{2+}$  иловых вод из подстилающих прослой горизонтов новозвксинских осадков. В геологическом словаре [4] гидротроилит описывается как минерал с формулой  $FeS \cdot nH_2O$ . Отмечается, что он иногда имеет запах сероводорода. Это природный гидрогель, существующий в восстановительной среде. С течением времени он переходит в пирит.

Интерес к исследованию этого минерала вызван тем, что до сего времени не стихают споры не только по поводу состава, структуры, но и вообще самой возможности его существования в донных осадках морских и пресноводных водоемов и водотоков. Другой важной причиной, по которой, он изучается во всем мире, является также его бальнеологическая роль в составе лечебных сульфидных грязей, а также экологическое значение как аккумулятора микроэлементов, и, прежде всего, ртути. В раннем диагенезе осадков происходит захват микроэлементов в структуру минерала и вывод их из круговорота [12]. Как считает И.И. Волков [2], в современных морских осадках основное количество кислоторастворимых сульфидов железа представлено рентгеноаморфным коллоидным моносульфидом железа черного цвета. Его состав и формула до сего времени уверенно не диагностирована. В настоящее время разными учеными он описывается как  $FeS \cdot nH_2O$  или  $FeS \cdot nH_2S$ , в то время как И.И. Волков [2] пришел к выводу, что

рентгеноаморфный коллоидный моносulfид железа является или sulfидом, не имеющим постоянного состава, или представляет собой смесь sulfидов в переменных соотношениях (мельниковит, маккиновит, грейгит). В.В. Фадеев [8] экспериментально изучил механизм образования пирита при взаимодействии Fe (III) с сероводородом в низкотемпературной области (до 300°C) и показал, что он носит трехстадийный характер. По его экспериментальным данным гидротроилит описывается в зависимости от стадии (I-III) формулой  $FeOHNS \cdot nH_2O$ , а после потери адсорбционной воды в  $FeOHNS$ . Важным является то, что в рентгеноаморфном моносulfиде железа наряду с адсорбционной водой установлено присутствие структурных протонов, локализованных в составе групп  $OH$  и  $HS$ . Это позволило В.В. Фадееву [8] описать его формулой  $FeOHNS \cdot nH_2O$ . Важной особенностью  $FeS \cdot nH_2O$ , как полагает [3], является его нахождение в донных осадках в виде sulfидного геля. Как полагает [3], гидротроилит способен мигрировать по трещинам и порам в более глубокие слои рыхлого осадка.

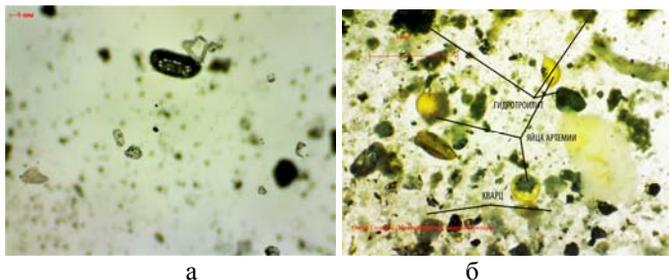
Пробы донных отложений и лечебных sulfидных грязей нами были отобраны в различных водоемах и водотоках и изучены в течение длительного периода (с 1999 по 2025 г.). Они в основном отбирались с помощью трубки конструкции ГОИН, а на мелководье с использованием пластиковой трубки, как это описано в работах [11, 12]. Наряду с оригинальной методикой изучения гидротроилита, которая будет детально описана ниже по тексту, применялись традиционные методы определения значений pH и Eh и содержаний  $S_{\text{sulfид}}$ . Значения pH и Eh измерялись с помощью портативного pH метра иономера – “Экотест 2000” сразу после отбора проб. Измерение массовой доли sulfидной серы ( $S_{\text{sulfид}}$ ) выполнялось в соответствии с [РД 52.24.525–2011].

Большой интерес вызывает ассоциация гидротроилита с другими минералами и фракциями. Для изучения была применена методика исследования вещественного состава отложений в озере Соленом на Таманском полуострове, которая детально описана в работе [5]. Поскольку гидротроилит гидратированный минерал, дальнейшие микроскопические исследования его проводились в мокром препарате со столбом воды 5 мм и применением USB микроскопа MiViewCap увеличением от 10 до 200 крат, с выводом изображения на экран компьютера и фотофиксацией с целью дальнейшей обработки. Затем этот же препарат сушился при комнатной температуре и при помощи этого же микроскопа исследовался сухой препарат. После чего, глинистая фракция была отмыта, и раствор стал прозрачным (при этом запах сероводорода сохранился). Было выполнено рентгеновское изучение глинистой фракции на приборе ДРОН-7,0 – дифрактометре. На оставшийся осадок песчаной размерности проведено воздействие сильным неодимовым магнитом. На магнитное поле реагировали только обломочные угловатые частицы черного цвета, что

указывает на их магнетитовый состав. В терригенной части также зафиксированы угловатые, не окатанные зерна кварца, сфена, монацита, магнетита и циркона. Среди аутигенных минералов обнаружены гипс, сера самородная и, собственно, гидротроилит.

Значения pH и Eh варьировались в пелоидах гиперсоленых озер соответственно следующим образом: в оз. Соленом (Медвеженском) от 6.7 до 7.1 и от  $-105.0$  до  $-18.0$  мВ, в оз. Большой Тамбукан от 6.5 до 7.0 и от  $-385$  до  $-106.0$  мВ, в оз. Эльтон от 6.6 до 6.9 и от  $-149.0$  до  $-87.7$  мВ [7]. Таким образом, для пелоидов всех озер были характерны кислотно-щелочные (от слабокислых до нейтральных) и восстановительные условия. Отметим, что все пелоиды, исследованных гиперсоленых озер, имели характерный для сероводорода запах, что органолептически указывало на присутствие в донных отложениях этого газа и моногидрата сульфида железа. Аналитически присутствие свободного сероводорода и твердых кислоторастворимых сульфидов было подтверждено нахождением массовой доли сульфидной серы ( $S_{\text{сульфид}}$ ). Содержание  $S_{\text{сульфид}}$  было для пелоидов оз. Соленого (Медвеженского) 2.25 мг/г вл. веса, в оз. Эльтон оно изменялось от 2.67 до 4.86 мг/г вл. веса [7]. Черные маслянистые пелоиды оз. Большой Тамбукан содержали  $S_{\text{сульфид}}$  в разное время от 3.76 до 10.62 мг/г вл. веса [9].

На поверхности раздела воды с терригенными и аутигенными минералами были зафиксированы, округлые, каплевидные или чечевицеобразные глобулы. Эти гелеобразные глобулы имели черный или стально-серый, ртутоподобный цвет, со смоляным блеском. Их размер варьировался от 0.3 до 1.2 мм. При механическом воздействии они распадались на меньшие капли или сливались в более крупные образования. На рис. 1а зафиксировано «столкновение» движущейся капли гидrogеля гидротроилита с кристаллом циркона. Запах сероводорода в полученном влажном материале сохранялся, глобулы не обладали магнитными свойствами, что подтверждает их идентификацию как моносульфида железа.



**Рис. 1.** а. Глобула гидротроилита с кристаллом циркона в сульфидных грязях. В поле микроскопа наблюдаются также зерна кварца. б. Глобулы гидротроилита, кварц, монацит и яйца жаброного рачка Артемии салины (*Artemia Salina*), оз. Соленое (Медвеженское).

Глобулы гидротроилита хорошо фиксируются в мокром препарате на белой подложке. Они представляют собой эллипсоидные стяжения с размытыми контурами размером от 0.2 до 0.5 мм черного цвета со смолоподобной поверхностью (рис. 1б). Кроме гидротроилита отчетливо проявляются кварц, монацит и яйца жаброного рачка Артемии салины (*Artemia Salina*).

Во время высыхания препарата мелкие капли объединяются и укрупняются. В обрамлении этих частиц проявляется самородная сера. Содержание гидротроилита достигает 20% в песчаной и алевритовой фракции, и 90% в тяжелой фракции. В сухом препарате кроме описанных выше минералов обнаружен сфен, монацит, корунд и циркон, магнетит.

Таким образом, нами установлено, что гидротроилит существует в естественной среде как гелеобразная субстанция, способная к перемещению и объединению в донных отложениях. Отметим, что препарат имел ярко выраженный запах сероводорода, который усиливался при воздействии на него HCl. В сухом препарате глобулы гидротроилита выглядели как стяжения черного цвета, блестящие и смолоподобные. Было показано, что преобразование гидротроилита из гелеобразного состояния в полутвердые ступки связано с потерей молекул адсорбционной воды. Несмотря на то, что гидротроилит в своем составе содержит магнитный элемент железо попытки выделить его при помощи сильного магнита, как из мокрого, так и сухого препарата не дали положительного эффекта. Он оказался, как и предполагалось ранее [2, 6], не магнитным и рентгеноаморфным. Выполненные ранее в работе [10] определения изотопного состава серы гидротроилита, равного ( $\delta^{34}\text{S} = -47.0\%$ ), из сульфидных грязей оз. Большой Тамбукан указывает на то, что образование сероводорода шло путем редукции сульфатных ионов с участием органического углерода при помощи сульфатредуцирующих бактерий. [10].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/> в Южном федеральном университете.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторский коллектив. Кавказские Минеральные Воды: К двухсотлетию 1903–2003 гг. Пятигорск: Вестник Кавказа, 2003. Т. 2. 400 с.
2. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
3. Гаврилов Ю.О. Диагенетическая миграция сульфидов в отложениях различных обстановок седиментации // Литология и полез. ископаемые. 2010. № 3. С. 133–150.
4. Геологический словарь / Под редакцией К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра, 1978. Т. 1. 158 с.
5. Голубова Н.В., Талпа Б.В., Прохорова С.Б. Вещественный состав и

условия образования соленосных отложений озера Соленое (Таманский полуостров) // Актуальные проблемы региональной геологии, литологии и минерации. Ростов-на-Дону, 2005. С. 29–34.

6. Страхов Н.М. Литология и полезные ископаемые. 1963. № 1. С. 7–21.

7. Трубник Р.Г., Федоров Ю. А. Оценка экологического состояния донных отложений по триаде химико-биологических показателей. Ростов-на-Дону – Москва: Бюро пропаганды Ростовской писательской организации, 2023. 120 с.

8. Фадеев В.В. Золото в процессах пиритообразования (экспериментальные исследования). Автореф. дис. на ... к.х.н. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 2003. 24 с.

9. Федоров Ю.А., Потапов Е.Г., Данилов С.Р., Салов Г.В. Особенности динамики гидрологических параметров, гидрохимических, биогеохимических показателей и компонентов рапы и сульфидной грязи оз. Большой Тамбукан // Известия ВУЗ, Северо-Кавказский регион, Естественные науки. 2002. С. 72–76.

10. Федоров Ю.А., Гриненко В.А., Устинов В.И. Особенности фракционирования изотопов серы и кислорода сульфатов озера Большой Тамбукан // Геохимия. 2004. № 1. С. 111–115.

11. Gar'kusha D., Fedorov Yu., Ovsepyan A. et al. Carbon Dioxide and Methane Emission into the Atmosphere and Its Relationship with Chemogenic Sedimentation in the Hypersaline Lake Baskunchak (Russia) // Water. 2025. V. 17. 738. P. 1–19.

12. Fedorov Y.A., Garkusha D.N., Dmitrik L.Y. et al. The use of chemical and instrumental methods in the study of the forms of occurrence of sulfides in bottom sediments // E3S Web of Conferences. 2021. V. 265. 02013 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126502013>

Using a set of methods (lithological-mineralogical, electron microscopic, chemical, physical-chemical, X-ray phase), the distribution and form of hydrotroilite migration were studied. Its identification was performed and its behavior in early diagenesis of bottom sediments of water bodies was studied. It was definitely established that hydrotroilite, an X-ray amorphous mineral, non-magnetic, colloidal iron monosulfide, was found in the peloids of lakes.

**Федулов В.Ю., Беляев Н.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: burdmeister@gmail.com)

## **Некоторые особенности распределения взвешенного органического углерода в Карском море (анализ многолетних данных)**

**Fedulov V.Y., Belyaev N.A.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Some distribution features of particulated organic carbon in the Kara Sea (analysis of the long-term data)**

Ключевые слова: Карское море, моря российской Арктики, взвешенный органический углерод, биогеохимия органического вещества.

Показаны основные тенденции распределения взвешенного органического углерода в Карском море на основе многолетнего ряда данных. Получены новые данные о поведении взвешенного органического углерода при изменении солёности. Показаны области повышения концентраций взвешенного органического углерода, связанные с биологическими процессами в весенний период и во фронтальных зонах.

В распределении растворенного (РОУ) и взвешенного (ВОУ) органического углерода в Карском море есть сходство и различие. Схожесть состоит в том, что значительные массы ВОУ как и РОУ поступают в море с речным стоком. Различие же в том, что распределение ВОУ гораздо более зависимо от концентраций взвешенного вещества (ВВ) и активности биологический процессов.

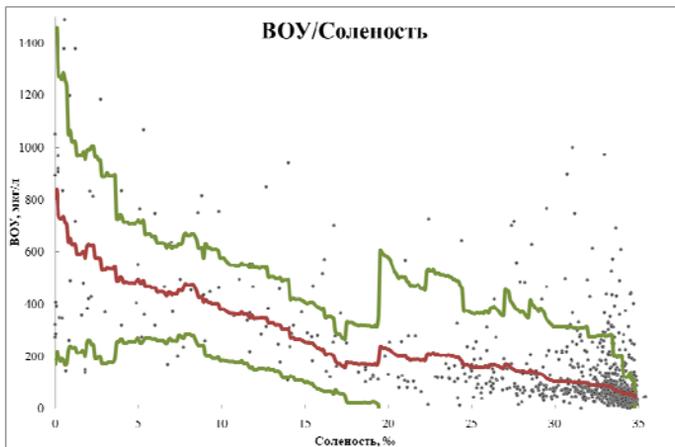
Поведение ВОУ относительно солёности было описано ранее в работах [1, 2], где была показана обратная зависимость ВОУ от солёности. Однако, результаты многолетних экспедиционных исследований в Карском море последних лет ее не подтверждают из-за высокой вариативности значений концентрации ВОУ как в зоне низкой солёности, так и в высокосолённых открытых частях моря (рисунок). Наиболее резкое снижение концентраций как ВОУ, так и ВВ отмечено при начале повышения солёности. Наряду с понижением концентраций ВОУ с удалением от речной зоны фиксируются области их повышений, связанные с биологическими процессами, которые хорошо маркируются повышением процентного содержания ВОУ во взвеси [3].

Доля органической компоненты в общей взвеси начинает возрастать, фиксируя смену источников поступления органического вещества (ОВ) во взвесь с терригенного на биогенный. Наибольшая доля ВОУ во взвеси фиксируются в весенний период в верхнем слое 0–60 м, снижаясь с глубиной. При этом, наиболее резкие градиенты концентраций в

поверхностном слое приурочены к фронтальным зонам повышенной биологической продуктивности.

При этом, отмечено обогащение ВОУ как поверхностных, так и придонных горизонтов. Однако, в придонных горизонтах соотношение ВОУ/взвесь увеличивается менее интенсивно, чем ВОУ.

Таким образом, повышенные концентрации ВОУ в Карском море фиксируются как в эстуарных зонах, так и в зонах высокой солености, показывая смену источников поступления ОБ. Значительные массы ВОУ автохтонного происхождения зафиксированы в толще вод в весенний период.



**Рисунок.** Зависимость ВОУ от солености в Карском море. Красная кривая – скользящее среднее, зеленые кривые – среднеквадратическое отклонение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. Wasserman P., Bauerreind E., Fortier M. et al. Particulate organic carbon flux to the Arctic ocean sea floor // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 101–138.
3. Беляев Н.А., Федулов В.Ю., Кравчишина М.Д., Шука С.А. Содержание органического углерода в растворенной и взвешенной формах в водах Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 217–270.

The main trends of suspended organic carbon distribution in the Kara Sea are shown based on a long-term data series. New data on the behavior of suspended organic carbon with changes in salinity are obtained. The areas of increased suspended organic carbon concentrations associated with biological processes in the spring and in frontal zones are shown.

**Федулов В.Ю., Беляев Н.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: burdmeister@gmail.com)

## **Особенности распределения растворенного органического углерода в Карском море (анализ многолетних данных)**

**Fedulov V.Y., Belyaev N.A.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Distribution features of dissolved organic carbon in the Kara Sea (analysis of the long-term data)**

Ключевые слова: Карское море, моря российской Арктики, растворенный органический углерод, биогеохимия органического вещества.

Показаны основные тенденции распределения растворенного органического углерода (РОУ) в Карском море на основе многолетнего ряда данных. Подтверждена корреляционная зависимость РОУ от солёности во всех районах моря во все сезоны. Выявлены зоны повышенного содержания РОУ, обусловленные биологическими процессами и показана их различная временная динамика. Зафиксированы 2 области в эстуарной зоне с различными источниками поступления РОУ. Главным фактором межгодовой изменчивости концентраций РОУ в Карском море является сезонность, обусловленная изменениями времени пика половодья и схода льда.

Результаты экспедиций проводимых с 2007 по 2024 гг. в Карском море были сведены в единую базу данных по содержанию РОУ, взвешенного органического углерода (ВОУ) и взвешенного вещества (ВВ) [1] При ее анализе была подтверждена ранее зафиксированная обратная зависимость концентраций РОУ от степени разбавления пресных вод солёными морскими водными массами [2, 3]. Она прослеживается во всех районах моря, на всех горизонтах и во все сезоны, формируя линейный тренд зависимости РОУ от солёности. Таким образом, вся акватория Карского моря испытывает на себе влияние речного стока. В то же время практически во всех районах моря наблюдаются отклонения от тренда в ту или иную сторону, обусловленные факторами среды, специфичными для каждого района. Наиболее явно эти отклонения выражены в весенне-летний период, в осенне-зимний они присутствуют менее явно.

Корреляционная зависимость РОУ-солёность в эстуарных зонах наиболее высока и практически полностью зависит от поступления терригенного РОУ и разбавления речных вод морскими. Наилучшим образом она прослеживается в пределах основного течения реки, в соседних же с ним районах отмечаются видимые отклонения. Например, в Обском эстуарии выявлено две области обогащения РОУ относительно тренда РОУ-солёность. Первая область приурочена к придонным горизонтам, вторая зафиксирована в толще вод, прилегающей к основному течению реки зоне

формирования вихревых течений. Обогащение в первой области сопровождается повышенным содержанием флуоресцирующих гуминовых веществ, что возможно связано с поставками РОУ в водную толщу из донных осадков. Во второй зоне увеличения флуоресцирующих гуминовых веществ не происходит, что может указывать на деструкцию органического вещества взвеси или биоты. Таким образом, не смотря на доминирующее влияние речного стока, показана вариативность поступления органического вещества (ОВ) в эстуарную экосистему, что не удавалось сделать ранее.

Во второй области данный процесс был зафиксирован единожды, тем не менее, он позволяет говорить о зафиксированной связи с автохтонным органическим углеродом в эстуарной зоне. Известно, что данные процессы активно проходят также и в других зонах околонулевой солености [3, 4], но выявление их влияния на изменения концентрации ОВ затруднено в связи с высокими концентрациями терригенного РОУ и относительно незначительными биомассами фитопланктона.

Связь с биологическими процессами более четко начинает фиксироваться во фронтальных зонах, где отмечены повышенные концентрации РОУ, связанные с активностью фитопланктона [4, 5]. В этих зонах изменение содержания биологической продуктивности приводит к повышению концентрации как РОУ, так и ВОУ. Зачастую это повышение происходит не синхронно.

Наиболее ярко фотосинтетические процессы влияют на содержание РОУ в весенний период. Повышенные относительно тренда концентрации явно связаны с возникновением планктоногенного органического вещества поставляемого в короткий период массового цветения. Статистически достоверно показано повышение концентраций РОУ в районах высокой солености в весенний период по сравнению с летним, осенним и зимним [1, 6]. Эти процессы ранее не учитывались, однако они вносят значительный вклад в геохимический баланс цикла органического углерода.

Одним из наиболее примечательных факторов является разная временная динамика вышеописанных процессов. Придонные процессы приурочены к одному району, растянуты во времени и не зависят от сезона. Процессы фронтальных зон напрямую связаны с гидродинамикой вод, приводящих к их формированию и, в связи с этим, время и место их наблюдения может сильно варьироваться. Процессы весеннего цветения обладают крайне резкой временной динамикой и поэтому крайне затруднены для изучения. Недостаточно изученным фактором является скорость деградации РОУ, поступающего с речным стоком. Известно, что его деградации практически не происходит в течение весенне-осеннего сезона, но процент деградировавшего ОВ за зиму остается неизвестным.

В исследованной картине распределения РОУ зафиксированы также области его низких концентраций, они, как правило, маркируют поступление вод иного генезиса и приурочены к зонам таяния ледников

вдоль побережья Новой Земли, глубоководным зонам смешения с бедными РОУ Атлантическими водными массами и водами Центрального Арктического бассейна. Низкий уровень содержания РОУ в ранневесенний период может быть обусловлен его деградацией за зимний период, но данная гипотеза требует подтверждения.

Определяющим фактором межгодовой изменчивости концентрации РОУ в Карском море, а также и других исследуемых гидрохимических и биологических параметров является ярко выраженная сезонность, которая определяется двумя параметрами: временем поступления основных масс речного стока и временем освобождения ото льда различных районов акватории моря. Каждый из этих процессов обладает высокой межгодовой изменчивостью, не зависящей друг от друга. Их сочетание формирует основную картину распределения РОУ в бассейне Карского моря. За многолетний период наблюдения изменений концентраций РОУ не удалось выявить два сезона, похожих один на другой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Н.А., Федулов В.Ю., Кравчишина М.Д., Шука С.А. Содержание органического углерода в растворенной и взвешенной формах в водах Карского моря // *Океанология*. 2024. Т. 64. № 2. С. 217–270.
2. Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
3. Köhler H., Meon B., Gordeev V.V. et al. Dissolved organic matter (DOM) in the estuaries of Ob and Yenisei and the adjacent Kara Sea, Russia // *Siberian river run-off in the Kara Sea / Stein R. et al. (Eds). Elsevier Science, 2003. P. 281–308.*
4. Суханова И.Н., Флинт М.В., Дружкова Е.И. и др. Фитопланктон северо-западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 605–619.
5. Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в Обском эстуарии и на прилежащем Карском шельфе // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 785–800.
6. Федулов В.Ю., Беляев Н.А., Колоколова А.В., Сажин А.Ф. Базовые геохимические параметры верхнего слоя вод юго-западной части Карского моря в зимний период // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 1. С. 115–122.

The main trends of the distribution of dissolved organic carbon (DOC) in the Kara Sea are shown based on a long-term data series. The correlation dependence of DOC on salinity in all areas of the sea in all seasons is confirmed. Zones of increased DOC content caused by biological processes are revealed and their different time dynamics are shown. Two areas in the estuarine zone with different sources of DOC are recorded. The main factor of interannual variability of DOC concentrations in the Kara Sea is seasonality caused by changes in the time of the flood peak and ice melt.

**Федулов В.Ю., Стрельцова Е.А., Пушкарева Е.М.,  
Беляев Н.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:  
burdmeister@gmail.com)

**Методы определения содержания некоторых компонентов  
в органическом веществе во взвешенной и растворенной  
формах**

**Fedulov V.Y., Streltsova E.A., Pushkareva E.M., Belyaev N.A.**  
(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Methods for determining the content of certain components in  
organic matter in suspended and dissolved forms**

Ключевые слова: Карское море, моря российской Арктики, органический углерод, взвесь, хлорофилл *a*, биомаркеры, липиды.

Представлены основные подходы к способам отбора, пробоподготовки, хранения воды и взвеси для определения концентрации общей взвеси, взвешенного и растворенного органического углерода, хлорофилла *a* и различных биомаркеров, применяемые в последние годы в Лаборатории химии океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

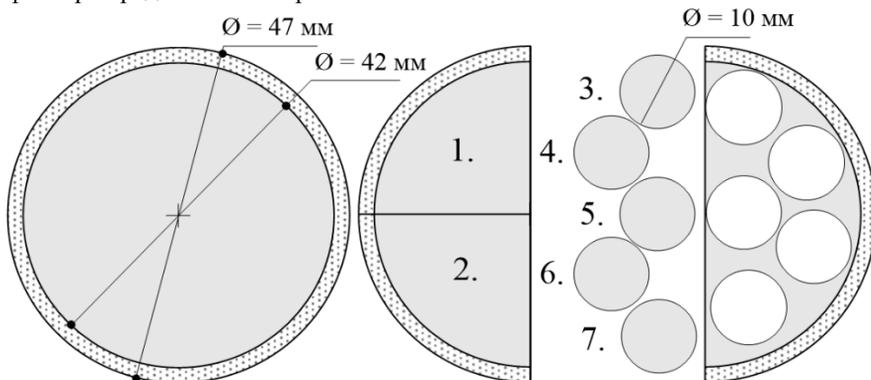
Методической разработкой сбора и анализа общего содержания и состава органического вещества во взвеси морской воды в Институте океанологии занимались с 60-х годов XX века [3–6]. Уже тогда существовало понимание о важности сравнения параллельно получаемых значений на всех этапах обработки данных.

В современных условиях данная тема приобрела особую актуальность в связи с необходимостью сравнения данных о составе органического вещества с другими параметрами исследуемых экосистем (содержанием взвешенного вещества, хлорофилла, состава фитопланктона и т.д.), что приводит к необходимости отбора проб с одного горизонта при однократном зондировании. Данное обстоятельство резко ограничивает объем, доступный для исследования воды, и вызывает необходимость в разработке единой методики сбора, хранения и анализа органического вещества на всех этапах.

В Лаборатории химии океана в результате работ по «Программе экосистем Восточной Арктики» эта методика была разработана. Основным достоинством данной методики является то, что анализ органического вещества производится на материале одного фильтра, что исключает ошибку неоднородности сбора материала и позволяет количественно сравнивать результаты аналитических определений [1].

Сбор материала производится на стекловолокнистый фильтр GF/F с условным диаметром пор 0.7 мкм. Фильтрация производится самотеком до

насыщения фильтра. Новизна разработанного метода заключается в схеме разделки фильтра с собранным органическим веществом и методах фиксации органического вещества для различных видов анализов, исключающих изменение его состава. Схема разделки стекловолнистого фильтра представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема разделки фильтра GF/F: 1. Определение биомаркеров; 2. Запасной; 3. Определение содержания хлорофилла а; 4. Определение содержания общего углерода; 5. Определение карбонатного углерода; 6–7. Запасной.

Таким образом, из материала, собранного на фильтр, можно выполнить анализ содержания общего, органического и карбонатного углерода, определить его изотопный состав, содержание гумусовых кислот, хлорофилла, а также использовать большую часть фильтра для анализа липидной фракции ОВ, которая в силу специфики решаемых задач вызывает у авторов наибольший интерес. Различные способы консервации отдельных частей фильтра после отбора практически исключает возможность трансформации исследуемых компонентов ОВ. Сбор материала для исследования органического вещества в растворенной форме также осуществляется из фильтрата из-под исследованного фильтра или из объема воды, отобранного для фильтрации.

Как показывалось выше, для авторов наибольший интерес представляет исследование липидной фракции ОВ. Фиксация фильтра реактивом Фолча с последующей заморозкой до проведения анализов решает одну из важных методических проблем – исключение трансформации липидной фракции ОВ. При этом остается не до конца решенной проблема определения содержания липидов в отобранном образце.

В океанологических исследованиях методы определения общего содержания липидов и их отдельных фракций делятся на три группы: гравиметрические, оптические и определение их концентрации через

измерение углерода. Все методы имеют как преимущества, так и недостатки. Оптические методы наименее трудоемки и занимают минимум времени, однако их точность вызывает большие сомнения. Гравиметрические являются практически эталонными, но для них необходимо достаточное количество материала для достижения необходимой точности. Наиболее перспективными представляется использование методов определения содержания углерода в исследуемых образцах. Данная методика разработана еще в 70-х годах [2], а снизившийся нижний предел измерения концентрации углерода на современном аналитическом оборудовании (анализаторы TOC, CHN) позволяет определять микроконцентрации вещества.

Предложенный метод заключается в измерении углерода в отобранной из общего объема экстракта аликвоте, составляющей от 5 до 25% объема экстракта. Далее отобранная аликвота помещается в контейнер для образцов, соответствующий типу прибора (керамическая лодочка, оловянный контейнер), растворитель выпаривается при 70°C, высушенная липидная фракция анализируется на приборе. Методические исследования показали, что достаточно 5 минут для полного удаления следов растворителя. Расчет содержания углерода липидов в образце производится из соотношений аликвота/объем экстракта, объем экстракта/количество образца.

Наибольшую методическую трудность представляет определение точного объема экстракта. Существуют два пути решения данной проблемы: определение объема экстракта гравиметрическим методом – взвешивание виалы известного веса с растворителем известной плотности, и волюметрический – измерение объема экстракта с помощью мерных пипеток или калиброванных шприцов. Первый способ дает гораздо большую точность, но применим только в условиях стационарной лаборатории. Второй – может использоваться при аналитических работах на борту судна. Преимуществом данного метода над гравиметрическим является существенно меньшая потребность в количестве определяемого вещества над ранее описанным методом определения липидов [2], – использование лишь части экстракта, оставляющая возможность проведения дальнейших его исследований.

Описанные выше методы сбора органического вещества и анализ липидной фракции являются частью разрабатываемой в лаборатории единой методики комплексного многокомпонентного анализа органического вещества в воде, взвеси, донных осадках и объектов биот. В законченном виде данная методика позволит стандартизировать методы исследования органического вещества в выше указанных объектах и даст возможность корректно сравнивать получаемые результаты с результатами других исследователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федулов В.Ю., Беляев Н.А., Пушкарева Е.А. Методические основы сбора и анализа взвеси для определения углерода, хлорофилла *A* и различных биомаркеров органического вещества // *Океанология*. 2025. (в печати).
2. Беляева А.Н. Метод определения микроколичеств липидов и их состава во взвеси // *Океанология*. 1974. Т. 14. № 6. С. 1101–1106.
3. Беляева А.Н., Романкевич Е.А. Химические превращения липидов при седиментогенезе // *Исследование органического вещества современных и ископаемых осадков*. М.: Наука, 1976. С. 81–103.
4. Лисицын А.П. Методы сбора и исследования водной взвеси для геологических целей // *Тр. ин-та океанологии АН СССР*. 1956. Т. XIX. С. 204–230.
5. Романкевич Е.А. Методы сбора взвешенного вещества в природных водах // *Методы гидрохимических исследований*. М.: Наука, 1978. С. 66–71.
6. Романкевич Е.А., Люцарев С.В. Сбор проб воды и выделение взвеси методом фильтрации // *Методы исследования органического вещества в океане*. М.: Наука, 1980. С. 7–16.

The paper presents the main approaches to the methods of sampling, sample preparation, storage of water and suspended matter for determining the concentration of total suspended matter, suspended and dissolved organic carbon, chlorophyll *a* and various biomarkers, which have been used in recent years in the Laboratory of Ocean Chemistry of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

**Швед В.А.<sup>1</sup>, Кравчишина М.Д.<sup>1</sup>, Егоров А.В.<sup>1</sup>,  
Калгин В.Ю.<sup>1</sup>, Ключанцева А.П.<sup>1</sup>, Новигатский А.Н.<sup>1</sup>,  
Клювиткин А.А.<sup>1</sup>, Стрелецкая И.Д.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [shved.va@ocean.ru](mailto:shved.va@ocean.ru); <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва)

**Концентрации метана в водной толще Западно-  
Арктического шельфа Евразии по результатам 96-го рейса  
НИС «Академик Мстислав Келдыш»**

**Shved V.A.<sup>1</sup>, Kravchishina M.D.<sup>1</sup>, Egorov A.V.<sup>1</sup>, Kalgin V.Yu.<sup>1</sup>,  
Kluchantseva A.P.<sup>1</sup>, Novigatsky A.N.<sup>1</sup>, Klyuvitkin A.A.<sup>1</sup>,  
Streletskaya I.D.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow)

**Methane concentrations in water column of the western  
Eurasian Arctic shelf according to the data of the 96<sup>th</sup> cruise of  
the R/V *Akademik Mstislav Keldysh***

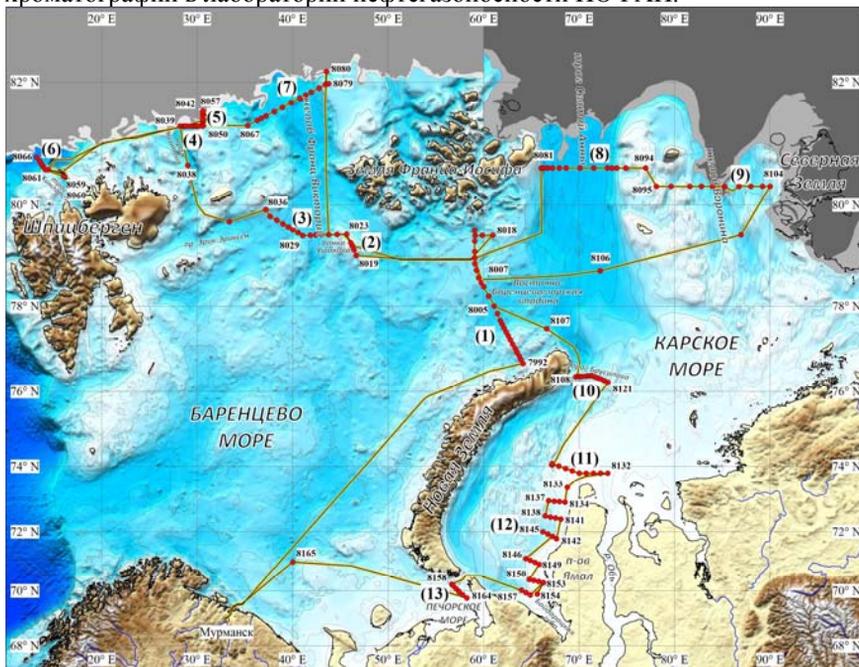
Ключевые слова: метан, субаквальные многолетнемерзлые породы, Баренцево море, Карское море, Печорское море, Приамальский шельф

В июле–августе 2024 г. в Баренцевом и Карском морях изучалось распределение концентраций растворенного метана и выявление аномальных зон, представляющих собой области, где возможна повышенная эмиссия метана в атмосферу. Установлена приуроченность высоких концентраций метана в воде, в первую очередь, к областям деградации субаквальных многолетнемерзлых пород на мелководном шельфе Западного Ямала и в Печорском море, а также к локальным зонам холодных метановых сипов и участкам речного стока.

Пространственно-временное распределение концентрации метана в водах Северного Ледовитого океана и роль эмиссии метана со дна арктического шельфа в атмосферу в период беспрецедентной скорости потепления остается предметом дискуссий [1–3]. Уникальность Карского и Баренцева морей в их вкладе в эмиссию метана связана с несколькими причинами: нефтегазоносным потенциалом региона, наличием субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП), речным стоком и отепляющим влиянием атлантической воды (АВ). Совокупность упомянутых причин способствует формированию неоднородного в пространстве распределения концентраций растворенного метана. Однако в ряде работ [4–9] показано, что наиболее весомый вклад в аномалии метана в воде Западно-Арктического шельфа Евразии вносит деградация СММП. Наше исследование призвано оценить разгрузку метана на арктическом

шельфе на основе нерегулярного мониторинга концентраций растворенного метана в водной толще от поверхности до дна.

В ходе 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» с 25 июля по 31 августа 2024 г. [10] получено 814 проб морской воды (рисунок), в которых определялись концентрации метана с помощью методики фазово-равновесной дегазации, известного как «headspace analysis» [11]. Пробы воды, отобранные в 100-мл флаконы, фиксировались раствором  $HgCl_2$  (1 мл). Измерение концентраций метана выполнялось с помощью газовой хроматографии в лаборатории нефтегазоносности ИО РАН.



**Рисунок.** Картограмма станций отбора проб воды (красные кружки, номера 7992–8165) и номера океанологических разрезов (от (1) до (13)), июль–август 2024 г.

Концентрации метана в поверхностном слое воды, как правило, были ниже, чем в придонном, и близки к равновесным с воздухом (2–3 нмоль/л). Исключение составляли станции на Приамальском шельфе (разрез 12), где концентрации метана возросли в 100 раз и достигали 234 нмоль/л (ст. 8153, горизонт 1.3 м).

На разрезах 2–10 в краевых шельфовых трогах наблюдались невысокие концентрации метана от поверхности до дна, близкие к равновесным с воздухом: в среднем 5.4 нмоль/л и 3.7 нмоль/л на севере Баренцева моря

(Хинлопен, Квитойя и Франц-Виктория) и Карского моря (Святой Анны, Воронина и порог Брусилова) соответственно. В трогах Хинлопен (станции 8059 и 8060, горизонты ~500 м) и Квитойя (ст. 8047, горизонт 265 м) зафиксированы повышенные концентрации метана (до 24 нмоль/л) у дна, связанные с холодными метановыми сипами. В водной толще трога Хинлопен (шельф Северного Шпицбергена) наблюдались акустические аномалии (газовые факелы) высотой до ~100 м, обусловленные пузырьковой разгрузкой метана из осадков сипов с «пятнами» бактериальных матов на поверхности дна. В трог Квитойя подобные газовые факелы не фиксировались, а бактериальные маты еще не задокументированы. Однако признаки эмиссии метана на границе раздела фаз вода–воздух не наблюдались даже над полями сипов изученных трогов. По мере всплытия в ~300–500-метровой толще воды пузырьки метана переносятся течениями, растворяются в воде и окисляются метанотрофным бактериопланктоном.

На разрезе 11 к северу от о. Белый, где глубина моря варьировалась от 16 до 50 м, низкие концентрации метана наблюдались в поверхностном слое, наибольшие – в подповерхностном слое, приуроченном к пикноклину. При этом максимальная концентрация (66 нмоль/л) достигалась на ст. 8125 в слое 16 м над узкой тектонической впадиной, перекрытой газонасыщенными осадками, связанными с «газовой трубой» (Б.В. Баранов, устное сообщение).

Для оценки влияния деградации СММП на концентрацию метана в воде выполнено шесть мини разрезов, пересекающих мелководный шельф Западного Ямала в интервале глубин от ~10–100 м (разрез 12, см. рис. 1). На самом северном из миниразрезов Пряймальского шельфа средняя концентрация метана составила 16 нмоль/л. Наибольшие его концентрации отмечались в поверхностном слое 2–20 м, которые достигали 32 нмоль/л на горизонте 6.5 м в мористой части разреза (ст. 8137). На следующем мини разрезе наблюдалось схожее распределение метана в водной толще, достигая максимальной концентрации (38 нмоль/л), наоборот, вблизи берега в слое ~6 м (ст. 8141). На третьем мини разрезе наибольший интерес вызывает ст. 8143 (глубина моря 50 м), где обнаружено поле метановых сипов с бактериальными матами на поверхности дна [10]. Концентрация метана в пробе воды над бактериальным матом, отобранной с помощью мультиторера, достигала аномально высокого значения – 7870 нмоль/л, что связано с пузырьковой разгрузкой метана из вскрытой осадочной толщи. На следующих трех мини разрезах наблюдалось увеличение концентраций метана по направлению к берегу с уменьшением глубины. В целом на шельфе Западного Ямала концентрации метана увеличивались с севера на юг по мере приближения к Байдарацкой губе: до 269 нмоль/л на горизонте 10.5 м (ст. 8154). Наиболее высокие концентрации метана в водной толще характерны для станций, расположенных в пределах зоны распространения

СММП [12].

В Печорском море (разрез 13), концентрация метана увеличивалась с севера на юг с уменьшением глубины от 122 м до 33 м: от 3–8 нмоль/л (ст. 8159) до 161 нмоль/л (горизонт 29 м, ст. 8164). Наибольшие концентрации метана наблюдались на станциях, расположенных в пределах области СММП [12].

Таким образом, наибольшие концентрации метана в водной толще Баренцева и Карского морей приурочены к областям распространения СММП и связаны с деградацией мерзлоты: юго-восточные части Баренцева моря (Печорское море) и Приямальский шельф (мелководный шельф Западного Ямала). В пределах этих областей концентрации метана в воде увеличивались в южном направлении, что косвенно может указывать на более высокие темпы деградации мерзлоты к югу от 72°–71° с.ш. на Южно-Карском шельфе и к югу от 70° с.ш. в Печорском море.

Распределение метана в водной толще Западно-Арктического шельфа Евразии требует выяснения причин и источников формирования областей скопления метана почти в каждом конкретном месте. Наибольшие концентрации метана связаны с участками деградирующей мерзлоты на мелководном шельфе и приурочены к придонным горизонтам. Помимо окисления метана в водной толще, его эмиссии в атмосферу препятствовала практически повсеместная плотностная стратификация вод при глубинах моря более 20–50 м. При жесткой плотностной стратификации на Южно-Карском шельфе слои повышенных концентраций метана формировались в приповерхностных горизонтах, что связано с влиянием речного стока.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020. Авторы признательны экипажу судна, А.С. Щуке, М.А. Калинину, Г.А. Ковалеву и В.В. Иванову за помощь при отборе проб воды.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-17-00334, <https://rscf.ru/project/25-17-00334/>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В. и др. Метан в поверхностных водах окраинных морей Северной Евразии // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 441–445.
2. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.

3. Egger M., Riedinger N., Mogollón J.M., Jørgensen B.B. Global diffusive fluxes of methane in marine sediments // *Nature Geoscience*. 2018. V. 11. №. 6. P. 421–425.
4. Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124.
5. Миرونюк С.Г., Колобакин А.А., Голенок О.А. и др. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение // *Геология морей и океанов: материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. 5. М.: ИО РАН, 2019. С. 192–196.
6. Рокос С.И., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // *Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода*. 2007. № 67. С. 66–75.
7. Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al Off-shore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // *Geophysical Research Letters*. 2013. No. 40(15). P. 3962–3967.
8. Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea // *Geochemistry*. 2019. V. 80. № 3. P. 1–9.
9. Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // *Journal Geophys. Res. Earth Surf*. 2015. V. 120. P. 1515–1529.
10. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. Аprobация системы мониторинга климата на основе заякоренных платформ, обсерваторий и судовых наблюдений в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Океанология*. 2025. Т. 65. № 3. С. 514–517.
11. Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазоворавновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.
12. Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С. и др. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // *Инженерные изыскания*. 2009. № 10. С. 38–41.

In July–August 2024, the distribution of dissolved methane concentrations in the Barents and Kara seas was studied and anomalous zones were identified, representing areas where increased methane emissions into the atmosphere are possible. The increased concentrations of methane in the water were found to be associated primarily with areas of degradation of submarine permafrost on the shallow shelf of Western Yamal and in the Pechora Sea, as well as with local zones of cold methane seeps and river runoff.

***СИСТЕМА БЕЛОГО МОРЯ,  
4-D ИССЛЕДОВАНИЯ***

***WHITE SEA SYSTEM,  
4-D INVESTIGATIONS***

**Брусилковский Ю.В.<sup>1</sup>, Балуев А.С.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: brusilovsky60@gmail.com; <sup>2</sup>Геологический институт РАН, Москва)

## **Модели глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря по результатам комплексного анализа геофизических данных**

**Brusilovsky Yu.V.<sup>1</sup>, Baluev A.S.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: brusilovsky60@gmail.com; <sup>2</sup>Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow)

## **Models of the deep structure of the Earth's crust of the paleorift system of the White Sea based on the results of a comprehensive analysis of geophysical data**

Ключевые слова: аномальное магнитное поле, источники магнитных аномалий, сейсмоплотностное моделирование, рифтогенные грабены, основной-ультраосновной магматизм.

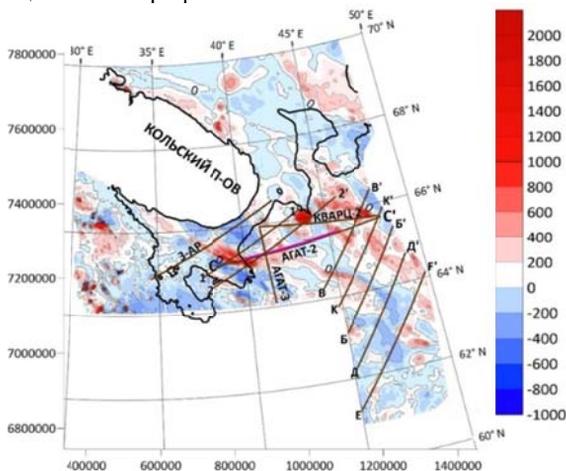
Предлагаются варианты моделей глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря. Для их создания были привлечены двумерные сейсмоплотностные модели строения земной коры, построенные на базе опорных сейсмических профилей 3-AP, Агат-2, Агат-3, Кварц 2, где была применена методика двумерной инверсии аномального магнитного поля.

Предлагаются варианты моделей глубинного строения земной коры палеорифтовой системы Белого моря, расположенной в зоне сочленения двух крупных тектонических элементов Восточно-Европейского кратона: Фенноскандинавского щита и Русской плиты. Для их создания были привлечены двумерные сейсмоплотностные модели строения земной коры [3], построенные на базе опорных сейсмических профилей 3-AP, Агат-2, Агат-3, Кварц 2, для которых была применена методика двумерной инверсии аномального магнитного поля, разработанная в лаборатории геофизических полей Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [2].

Основой для анализа магнитного поля послужила схематическая карта АМП, синтезированная авторами по материалам магнитных съемок, выполненных в акваториях Баренцева и Белого морей в разное время (рис. 1).

Серия профилей 3-AP, I-I, II-II демонстрируют модели распределения источников АМП. Беломорский фрагмент профиля 3-AP, проходит через центральную часть палеорифтовой системы Белого моря. Было выполнено решение обратной задачи, и подобраны модели распределения источников аномального магнитного поля. Результаты моделирования подтвердили существование глубинного магматического очага, локализованного в

пределах Керецкого палеорифта.



**Рис. 1.** Схематическая карта АМП Беломорского региона с профилями для которых было выполнено геолого-геофизическое моделирование.

В магнитном поле этот очаг магматизма выделяется интенсивной магнитной аномалией в пределах Беломорской шовной зоны. Верхние кромки источника находятся на глубине 8–10 км, а нижние ограничиваются на глубине 38–40 км, его эффективная намагниченность составляет 2–3 А/м. Это говорит о том, что очаг магматизма связан с верхней мантией. Он уверенно прослеживается на профиле I-I, но на профиле II-II глубина нижних кромок резко уменьшается до 15–20 км, где с этим очагом связано Верхотинское кимберлитовое поле (рис. 2).

Профиль «Агат-3» (Усть-Пинега – Белое море) расположен субмеридионально и пересекает поля кимберлитовых трубок, в том числе и алмазоносных (рис. 1, 3). По данным двумерного сейсмоплотностного моделирования разрез земной коры по профилю Агат-3 расчленяется на верхнюю (2.76–2.80 г/см<sup>3</sup>), среднюю (2.82–2.86 г/см<sup>3</sup>) и нижнюю (2.96–3.00 г/см<sup>3</sup>) кору. Мощность верхней коры варьирует в пределах 10–20 км, резко сокращаясь в центральной части разреза под рифтогенными грабенами. Средняя кора в этом месте, наоборот, испытывает значительное увеличение мощности с 5 до 15 км. «Раздутие» средней коры контролируется листрическими detachments, выходящими к подошве средней коры, а в верхней своей части являются грабенообразующими сбросами. Такая структура могла образоваться в результате растяжения земной коры еще в рифее при формировании рифтовой системы. Мощность нижней коры примерно одинакова вдоль профиля (около 10 км), лишь в средней части происходит ее увеличение до 15 км в зоне контакта с листрическим detachmentом, что характерно практически для всех областей

континентального рифтогенеза. Это область «всасывания» нижележащего более плотного субстрата и его возможного плавления в результате декомпрессии, что могло являться источником основного-ультраосновного магматизма в среднем палеозое. Именно над этой областью разуплотнения субстрата и увеличения мощности средней коры расположены основные кимберлитовые поля Архангельской алмазоносной провинции. С другой стороны, интенсивные длиннопериодные магнитные аномалии на этом профиле отражают насыщенность продуктами основного-ультраосновного магматизма в верхнем гранито-метаморфическом слое земной коры. В верхней же части модели наблюдаются локальные, короткопериодные аномалии, связанные с магматическими телами, внедренными в осадочный чехол во время активизации среднепалеозойского (девонского) магматизма.

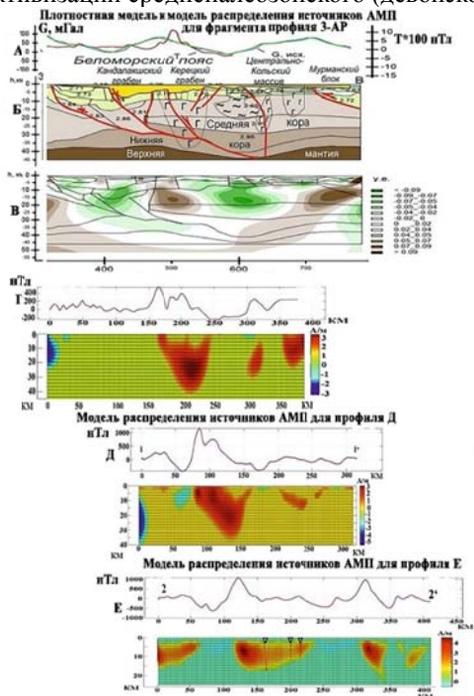


Рис. 2. Геолого-геофизические модели 3-АР, I-I, II-II.

**Модели распределения источников АМП в формате 2D для серии профилей восточной части Мезенской синеклизы.**

На своем протяжении представленные профили пересекают основные тектонические структуры, Подобранные для этих профилей модели демонстрируют приуроченность источников АМП к двум гипсометрическим уровням. Так источники, аппроксимирующие

длиннопериодные аномалии, имеют глубину нижних кромок до 15–30 км и протяженность вдоль профиля в десятки километров.

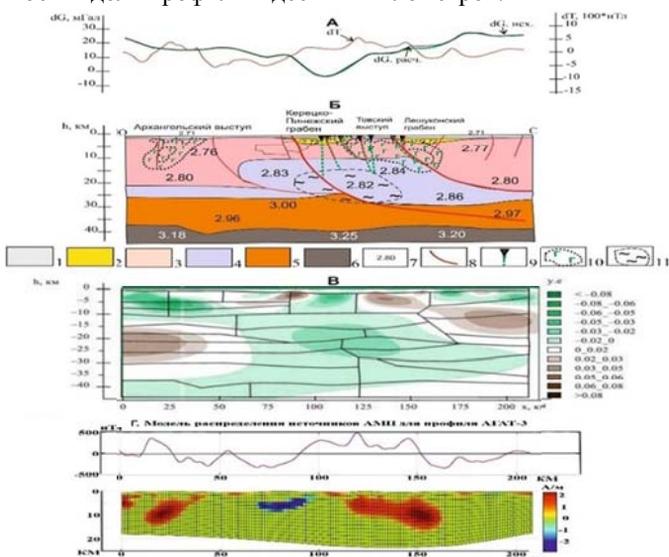
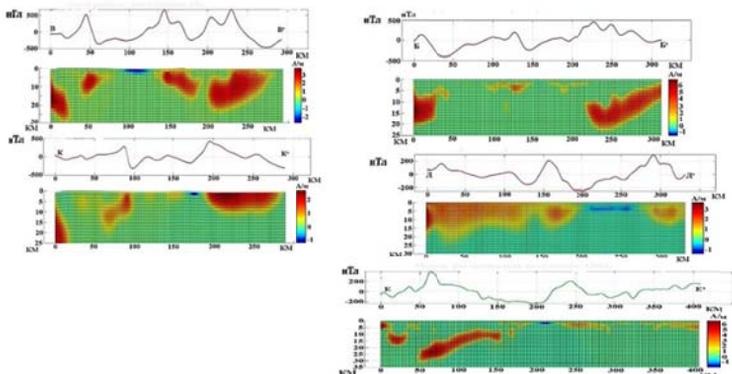


Рис. 3. Профиль «Агат-3» (Усть-Пинега – Белое море).

По своему пространственному положению они соответствуют простираниям палеорифтовых структур (Лешуконскому, Мезенскому, Сафоновскому и Усть-Выйскому грабенам). Вероятнее всего, эти глубинные источники АМП соответствуют очагам магматизма, распространявшимся вдоль простирания Беломорской палеорифтовой системы: северо-запад – юго-восток и генетически связанных с заложением этих рифтогенных структур в среднем и позднем рифее. Кроме глубинных источников АМП, на моделях выделяется серия локальных источников, дислоцированных в интервале 0–10 (км), интенсивностью 0.5–2 (А/м). Пространственно эти источники выражены локальными аномалиями в пределах отдельных рифтогенных структур и отражают внедрение магмы в осадочную толщу в среднепалеозойский (девонский) этап реактивации Беломорской рифтовой системы и, скорее всего эти, приповерхностные, короткопериодные источники аномалий соответствуют элементам позднепалеозойского Мезенского траппово-дайкивого поля, расположенного в осадочном чехле и описанном [1] по результатам интерпретации данных аэромагнитных съемок.

Совместная интерпретация сейсмоплотностных моделей и моделей распределения источников магнитных аномалий дала авторам возможность установить связи между физическими параметрами моделей и геологическими структурами или телами и создать обобщенные геолого-

геофизические модели исследуемых участков земной коры.



**Рис. 4.** Модели распределения источников АМП в формате 2D для низкочастотной составляющей магнитного поля для серии профилей восточной части Мезенской синеклизы.

Интенсивные длиннопериодные магнитные аномалии отражают, скорее всего, насыщенность продуктами основного-ультраосновного магматизма в верхнем гранито-метаморфическом слое земной коры. В верхней же части модели распределения источником магнитных аномалий наблюдаются локальные, короткопериодные аномалии, связанные с магматическими телами, внедренными в осадочный чехол во время активизации средне-(девонского) и позднепалеозойского магматизма.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буш В.А., Калмыков Б.А. Новые данные по домезозойскому внутриплитному магматизму Восточно-Европейской платформы // Геотектоника. 2015. № 5. С. 43–61. DOI: 10.7868/S0016853X15050021
2. Пальшин Н.А., Иваненко А.Н., Алексеев Д.А. Неоднородное строение магнитоактивного слоя Курильской островной дуги // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11 (3). С. 583–594.
3. Шаров Н.В., Бакунович Л.И., Белашев В.З. и др. Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11 (3). С. 566–582.

The paper offers variants of models of the deep structure of the Earth's crust of the paleorift system of the White Sea. To construct them, two-dimensional seismic density models of the structure of the Earth's crust were used, based on the reference seismic profiles 3-AR, Agat-2, Agat-3, Quartz-2, for which the technique of two-dimensional inversion of an anomalous magnetic field was applied.

**Вяткин Е.Д.<sup>1</sup>, Энтин А.Л.<sup>1</sup>, Репкина Т.Ю.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, г. Москва, e-mail: egrvyatkin@gmail.com; <sup>2</sup>Институт географии РАН, г. Москва)

## **Моделирование гляциоизостатических деформаций в программе SELEN: возможности и ограничения (на примере котловины и берегов Белого моря)**

**Vyatkin E.D.<sup>1</sup>, Entin A.L.<sup>1</sup>, Repkina T.Yu.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow; <sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow)

## **Modeling of glacio-isostatic adjustments in SELEN: capabilities and limitations (a case study of the White Sea)**

Ключевые слова: гляциоизостатические деформации, относительный уровень моря, пространственное моделирование, SELEN, Белое море.

Представлены результаты моделирования гляциоизостатических деформаций и относительного уровня Белого моря с помощью ПО SELEN за последние 17 тыс. лет. Созданы модели высот и глубин с разрешением ~10 км, что детальнее существующих глобальных моделей. Сравнение реконструкций положения береговых линий с геологическими данными позволило оценить ограничения SELEN для региональных задач и предложить пути их преодоления.

Реконструкция изменения рельефа котловины и берегов Белого моря, имеет ключевое значение для понимания его сложной послеледниковой истории, связанной с оледенениями, дегляциацией и морскими трансгрессиями. Этот регион до настоящего времени испытывает гляциоизостатическое поднятие [8, 9, 15]. Существующие глобальные модели гляциоизостатической компенсации, например ICE-6G [13], имеют низкое пространственное разрешение (порядка 1°), что ограничивает их использование для детального анализа региональных процессов, таких как открытие проливов или формирование береговых линий. Программный комплекс SELEN, численно решающий уравнение уровня моря для сферической, слоистой и вязкоупругой Земли, предоставляет возможность моделирования гляциоизостатической компенсации с задаваемыми пользователем параметрами, в том числе с более высоким пространственным разрешением [16]. Это открывает потенциал для создания более детальных региональных реконструкций.

Целью данной работы являлась проверка возможности создания достоверных цифровых моделей высот и глубин (surface topography and bathymetry) котловины и берегов Белого моря с пространственным разрешением ~10 км с помощью SELEN. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Адаптировать программный комплекс SELEN для работы с высоким пространственным разрешением путем модификации его входных файлов.
2. Выполнить моделирование гляциоизостатических деформаций для ключевых временных срезов позднеледниковья и голоцена.
3. Провести постобработку и визуализацию результатов моделирования.
4. Верифицировать полученные реконструкции путем их сравнения с геологическими данными.

### Методика исследования

Основная методическая задача заключалась в повышении стандартного разрешения SELEN ( $R=100$ , что соответствует ячейкам размером  $\sim 40$  км) до  $\sim 10$  км ( $R=400$ ). Это потребовало комплексной подготовки входных данных с использованием специально разработанных скриптов на языке Python.

#### 1. Генерация сетки высокого разрешения.

Для пространственной дискретизации в SELEN используется икосаэдральная сетка Тегмарка [17]. Стандартные утилиты не позволяли создавать сетки с разрешением выше  $R=100$ . С помощью программы *icosahedron* [18] была предпринята попытка генерации сетки  $R=400$ , однако это привело к ошибке переполнения переменных в исходном коде программы. Ошибка была выявлена и исправлена (формат записи целых чисел изменен с `ib` на `il0`), что позволило успешно сгенерировать файл с координатами 6 379 212 ячеек. На основе этого файла были созданы необходимые для SELEN файлы ячеек (`px-R400.dat`) и основных широт (`px-lat-R400.dat`).

#### 2. Модификация входных данных.

**Ледниковая нагрузка:** поскольку региональной высокодетальной модели ледниковой нагрузки для региона Белого моря не существует, в качестве источника данных использовалась глобальная модель ICE-6G с разрешением  $1^\circ$ . Значения мощности льда для 52 временных срезов (с шагом 500 лет) были интерполированы с исходной сетки на сгенерированную сетку Тегмарка  $R=400$  методом линейной интерполяции. Важно отметить, что такая процедура формально повышает разрешение, но не добавляет новой информации о распределении ледовой нагрузки, что является ключевым ограничением.

**Поле высот и глубин:** для более точного учета поля высот и глубин в стандартную для SELEN глобальную ЦМР ETOPO1 была интегрирована совмещенная ЦМР Горла Белого моря (разрешение 100 м), созданная авторами. Полученная гибридная глобальная ЦМР была интерполирована на сетку  $R=400$ .

**3. Запуск моделирования и постобработка.** Моделирование выполнялось на высокопроизводительном компьютере (6-ядерный Intel Xeon, 64 ГБ RAM) и заняло около 72 часов. Попытка запуска с разрешением  $R=800$  оказалась неудачной из-за нехватки оперативной памяти. Выходные данные SELEN, представляющие собой текстовые файлы с информацией о

высотах и глубинах для каждого временного среза, были преобразованы в растровый формат GeoTIFF.

### **Результаты и их верификация**

В результате моделирования была получена серия цифровых моделей палеорельефа (поля высот и глубин) для временных срезов 17.0, 13.5, 11.5, 10.0 и 3.5 тыс. лет назад с разрешением  $\sim 10$  км. За ноль в моделях принимается относительный уровень моря, который также вычисляет SELEN. Визуальное сравнение с исходной моделью ICE-6G показало их общую согласованность, но с локальными расхождениями, наиболее заметными в Бассейне Белого моря и проливе Горло. Верификация геологическими данными проводилась путем сравнения положения реконструированных береговых линий с базой данных, объединившей данные о положении относительного уровня Белого моря, полученные до 2016 г. [9], а также результатами исследований последних лет [1, 5–7 и др.]. Анализ выявил значительные расхождения моделей с геологическими данными.

**Пролив Горло:** согласно геологическим данным, связь Белого моря с Баренцевым через пролив Горло восстановилась около 13.4–13.2 тыс. лет назад [4, 5]. Однако в полученной модели на срезах 13.5, 11.5 и 10.0 тыс. лет назад пролив остается перекрытым сушей, что является грубым противоречием. Это не позволяет модели корректно воспроизвести ни позднеледниковую трансгрессию, ни последующее усиление притока баренцевоморских вод [14].

**Береговые линии:** на срезах 11.5 и 10.0 тыс. лет назад реконструированная береговая линия не совпадает с индексными точками из базы данных относительного уровня моря, которые указывают на ее реальное положение в прошлом.

**Конфигурация бассейна:** на срезе 10.0 тыс. лет назад модель показывает, что береговая линия Белого моря располагалась на 100 км западнее современной, что не находит подтверждения в геологических исследованиях [2, 3].

### **Обсуждение и выводы**

Несмотря на формальное повышение разрешения и подготовку исходных данных, реализация модели гляциоизостатических деформаций в SELEN не позволила создать достоверные цифровые модели палеорельефа Белого моря. Основная причина расхождений может заключаться в том, что SELEN — в первую очередь инструмент для глобального моделирования уровня моря, что ограничивает его применение в более детальных региональных исследованиях. Другой причиной может быть недостаточная детальность данных о ледниковой нагрузке: интерполяция данных о мощности льда из глобальной модели ICE-6G (разрешение  $\sim 111$  км) на высокодетальную сетку ( $\sim 10$  км) не способна воспроизвести локальные и региональные особенности ледникового щита, которые определяли

характер гляциоизостатической реакции. Возможным путем решения этой проблемы представляется проведение серии численных экспериментов по изменению во входных данных положения границ ледникового щита, полученных геологическими методами, например [2, 3, 10–12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова Е.А., Полякова Е.И., Романенко Ф.А. Диатомовые водоросли в голоценовых отложениях Терского берега Белого моря в связи с историей его развития в послеледниковое время // Арктика и Антарктика. 2020. С. 1–16.
2. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-(35), 36 – Апатиты. Объяснительная записка. СПб, 2012.
3. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-37 – Архангельск. Объяснительная записка. СПб, 2012.
4. Колька В.В., Корсакова О.П. Положение береговой линии Белого моря и неотектонические движения на северо-востоке Фенноскандии в позднеледниковье и голоцене // Система Белого моря. Процессы осадкообразования, геология и история. 2017. № 4. С. 222–249.
5. Корсакова О.П. Побережье Белого моря в пределах Фенноскандинавского кристаллического щита в неоплейстоцене и голоцене // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 6. С. 883–897.
6. Репкина Т.Ю., Кублицкий Ю.А., Леонтьев П.А. и др. Изменение относительного уровня Белого моря в позднеледниковье – раннем голоцене (восточный берег пролива Горло, озеро Средняя Треть) // Геоморфология и палеогеография. 2023. № 4 (54). С. 105–130.
7. Репкина Т.Ю., Леонтьев П.А., Крехов А.К. и др. Прибрежные дюны устьевой области р. Майды (Зимний берег Белого моря): строение и история развития // Океанология. 2024. Т. 64. № 5. С. 816–831.
8. Шварев С.В. Морфотектоника, сейсмичность и экзогенные процессы Кольского полуострова // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 8. С. 1135–1152.
9. Baranskaya A.V., Khan N.S., Romanenko F.A. et al. A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic coast // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 199. P. 188–205.
10. Korsakova O., Vashkov A., Nosova O. European Russia: glacial landforms during deglaciation // European Glacial Landscapes. The Last Deglaciation. Elsevier, 2023. P. 105–110.
11. Korsakova O., Vashkov A., Nosova O. European Russia: glacial landforms from the Bølling-Allerød Interstadial // European Glacial Landscapes. The Last

Deglaciation. Elsevier, 2023. P. 305–310.

12. Korsakova O., Vashkov A., Nosova O. European Russia: glacial landforms from the Younger Dryas Stadial // *European Glacial Landscapes. The Last Deglaciation*. Elsevier, 2023. P. 467–472.

13. Peltier W. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2004. V. 20. P. 111–149.

14. Polyakova Y., Agafonova E., Novichkova E. et al. Holocene Paleoenvironmental Implications of Diatom, Non-Pollen Palynomorph, and Organic Carbon Records from the Kandalaksha Bay of the White Sea (European Arctic) // *Geosciences*. 2023. V. 13. № 2. 56.

15. Ramsay W. Über die Geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartarzeit // *Fennia*. 1898. V. 16. № 1. 151 p.

16. Spada G., Melini D. SELEN (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea-level equation in glacial isostatic adjustment modeling // *Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12 (12). P. 5055–5075.

17. Tegmark M. An Icosahedron-based Method for Pixelizing the Celestial Sphere // *The Astrophysical Journal*. 1996. V. 470. № 2. P. 81–84.

18. Tegmark M. Icosahedron home page [Электронный ресурс]. URL: <https://space.mit.edu/home/tegmark/icosahedron.html> (дата обращения: 25.04.2025).

We present results of modeling glacioisostatic deformations and relative sea level of the White Sea over the last 17 ka using the SELEN software. Models of elevations and depths were generated with a resolution of ~10 km, providing greater detail than existing global models. Comparison of the reconstructed shoreline positions with geological data made it possible to assess the limitations of SELEN for regional applications and to propose ways to overcome them.

**Демиденко Н.А., Гордеев В.В., Коченкова А.И.**

(Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва,

e-mail: [demi.na@ocean.ru](mailto:demi.na@ocean.ru))

**Современный гидрологический режим и динамика наносов в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя**

**Demidenko N.A., Gordeev V.V., Kochenkova A.I.**

(Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow)

**The modern hydrological regime and sediment movement in the Mezen and Kuloy estuaries**

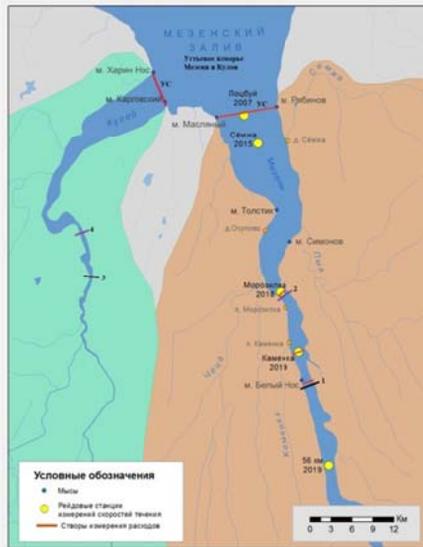
Ключевые слова: гидрологический режим, зона смешения вод, взвешенные наносы, максимум мутности, эрозионно-аккумулятивные процессы

Рассмотрено современное состояние гидрологического режима в устьевых областях рек Мезени и Кулоя на основе специализированных экспедиционных исследований. В макроприливных эстуариях с величиной приливов более 4 м придонное перемещение взвешенных наносов вверх по эстуарию возникает вследствие асимметрии скоростей приливных течений. Зона смешения речных и морских вод функционирует как своеобразный гидродинамический и геохимический барьер, формируя маргинальный фильтр, разделяющий эстуарий и прилегающее устьевое взморье на области с резко отличающимися условиями осадконакопления.

Мезенский залив и устьевая область р. Мезень и р. Кулой расположены на северо-востоке Европейской территории России (ЕТР) в Архангельской области. Устьевые области Мезени и Кулоя относятся к эстуарному типу. Они имеют сложную структуру, которая включает два речных устьевых участка, подверженных влиянию приливных колебаний уровня, два расширяющихся вниз по течению приливных эстуария и общее устьевое взморье – юго-восточную часть Мезенского залива (рис. 1). За период наблюдений с 1921 по 2021 гг. средний годовой расход воды в вершине устьевой области р. Мезень составил  $841 \text{ м}^3/\text{с}$ , годовой сток воды в замыкающем створе с. Дорогорское составил  $26.5 \text{ км}^3/\text{год}$ . Сток по устьевой области р. Кулоя получен расчетным путем и средний расход в вершине эстуария Кулоя у м. Заячий Нос с учетом притока р. Сояна равен  $185 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем стока –  $584 \text{ км}^3/\text{год}$  [5]. Небольшая среднемноголетняя мутность р. Мезени связана с низкой интенсивностью эрозионных процессов в регионе. Средняя мутность воды в вершине устьевых участков р. Мезени составляет  $30 \text{ г/м}^3$ , а в половодье мутность увеличивается до  $100 \text{ г/м}^3$ . Объем стока взвешенных наносов равен в вершине устьевой области р. Мезени изменяется в пределах  $0.69\text{--}0.9 \text{ млн. т/год}$  [1, 2].

Для исследования гидрологического режима эстуариев Мезени и Кулоя использовались различные измерительные комплексы. Для измерения приливных колебаний уровня использовались автономные записывающие устройства – логгеры двух типов: Levelogger Solinst модель 3001 LT F15/M5,

Levellogger Edge модель 3001. Измерение скоростей течения и приливных расходов воды в эстуариях Мезени и Кулоя производились с помощью акустических доплеровских измерителей расхода воды ADCP 1200 Rio Grande в зоне смешения пресных и соленых вод, и измерителя ADCP серия RiverRay в морской части эстуариев. Для измерения температуры и солености воды на суточных станциях и при производстве продольных разрезов вдоль эстуариев применялся многопараметрический зонд YSI серии 6600. Отбор проб воды для определения концентрации взвешенного вещества в различных зонах эстуариев производился с помощью пластиковой емкости с поверхностного горизонта и багетметра Нискина (3 л) с глубинных горизонтов. Для определения массовой концентрации взвеси при мутности воды свыше 1000 мг/л пробы фильтровались через плотные бумажные фильтры, а при более низких концентрациях взвеси – через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм под вакуумом –400 мБар.



**Рис. 1.** Схема устьевых областей Мезени и Кулоя. УС – устьевые створы эстуариев Мезени и Кулоя; 1 – вершина эстуария Мезени – м. Белый Нос; 2 – граница проникновения морской воды в эстуарий Мезень; 3 – устьевой створ эстуария Кулоя – м. Заячий Нос; 4 – граница проникновения морской воды в эстуарий Кулоя.

Наиболее ярко выражены в Мезенском заливе приливные полусуточные колебания уровня. Сизигийный прилив в районе устьевое створа у д. Семжи достигает 8.5 м и 4.8 м в квадратуру. Продолжительность подъема уровня воды равна 5.0 ч., падения уровня воды – 7.4 ч., коэффициент асимметрии приливной волны  $K_{ac} = 0.39$ . Начиная от створа д. Семжи, вверх

по эстуарию Мезени, приливы быстро уменьшают свою величину. В вершине эстуария (м. Белый Нос) прилив уменьшается на 60%.

Во время сизигийных приливов наибольшие обратные (приливные) скорости течения в устьевом створе Мезени отмечаются через 3 ч. после малой воды (МВ) и за 2–3 ч. до полной воды (ПВ) и достигают 1.6–1.8 м/с, а наибольшие скорости прямого (отливного) течения наблюдаются через 3 ч. после ПВ и достигают 1.2 м/с. В других местах эстуария [2], скорости приливных и отливных течений могут быть заметно больше, чем в нижней части эстуария. На участке м. Толстик – устье р. Пыя скорость течения во время прилива достигает наибольших для эстуария Мезени значений до 3.0 м/с. Продолжительность приливного течения здесь 3.5 ч, отливного – 9 ч. В районе п. Каменка приливные течения достигают 1.6 м/с.

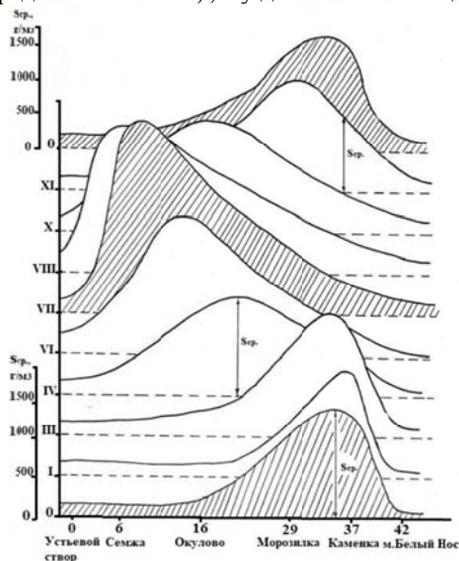
Воды Мезенского залива круглогодично являются хлоридно-натриевыми. Диапазон изменения солености в Мезенском заливе – 20.0–33.6 епс. Весной наблюдается максимальное распреснение, и практически весь залив занимает зона смешения речных и морских вод. В мае среднемноголетняя величина солености воды в заливе (по данным ГМС Абрамовский маяк) равна 23.9 епс. Распределение солености по глубине Мезенского залива характеризуется изохалинностью. Водные массы в Мезенском заливе хорошо перемешаны. В эстуариях Мезени и Кулоя формируется зона смешения речных и морских вод. Протяженность зоны смешения в эстуарии Мезени составляет около 35 км, в эстуарии Кулоя – 25 км [2]. В этом случае морские воды могут достигать створа д. Морозилки (28 км от устьевого створа). Средняя величина продольных градиентов солености составляет 1.5–2.0 епс на 1 км, достигая на отдельных участках значений 3–4 епс.

Эрозионно-аккумулятивные процессы в прибрежной зоне и эстуарии Мезени обусловлены приливными течениями, речными расходами воды и стоком наносов, ветровым волнением и вдольбереговым потоком наносов за счет абразии морских берегов. В приливных морях и эстуариях главной причиной изменения потока наносов является абразия морских берегов. В Мезенском заливе ее темпы могут достигать 10 м/год. В среднем скорость отступления высоких и обрывистых берегов эстуария Мезени около 1.5 м/год, что приводит к разрушению жилой застройки устья р. Семжи.

Характерной особенностью динамики взвешенных наносов в зоне смешения речных и морских вод является формирование зоны максимальных значений мутности или «литоклина». Возникновение этой зоны обусловлено процессами флокуляции глинистых частиц и органического вещества, а также особенностями эстуарийной циркуляции воды. В ее пределах мутность воды значительно превосходит мутность в речных и морских водах. Образование литоклина в эстуариях Мезени и Кулоя зависит от трансформации и асимметрии приливной волны при ее проникновении. Волна в прилив распространяется здесь с большей

скоростью, чем во время отлива. В результате наносы в основном перемещаются в сторону суши, к вершине эстуария.

В эстуарии Мезени миграция зоны максимума мутности за приливный цикл составляет 20–25 км. Течения перемещают наносы различной крупности и создают зону высокой мутности в эстуарии – «пробку мутности» с максимальной концентрацией взмученных в прилив наносов до 10–13 кг/м<sup>3</sup>, ядро которой располагается в 15–20 км от устьевового створа (рис. 2). У д. Пьяя величина мутности в придонном горизонте колеблется от 0.5 до 8.5 кг/м<sup>3</sup> (средняя – 3.5 кг/м<sup>3</sup>), а у д. Семжа от 0.35 до 13 кг/м<sup>3</sup> [2].



**Рис. 2.** Динамика максимума мутности воды вдоль фарватера в эстуарии Мезени за приливный цикл.

В период наблюдения на суточной станции в августе 2015 г. на фарватере эстуария Мезени по траверсу д. Семжа при квадратурных приливах мутность воды в поверхностном горизонте изменялась от 128 г/м<sup>3</sup> в ПВ до 1.3 кг/м<sup>3</sup> в МВ. В придонном горизонте мутность воды изменялась в значительном диапазоне от 150 г/м<sup>3</sup> в ПВ до 56 кг/м<sup>3</sup> в МВ при подходе «пробки мутности». Такие максимальные значения мутности в пределах 40–56 кг/м<sup>3</sup> наблюдались продолжительностью 2 ч. при МВ, смене течений и начальной фазе прилива. Максимальная концентрация взвешенного вещества в воде в придонном горизонте была 56.3 кг/м<sup>3</sup> и наблюдалась в начале прилива при скоростях течения 0.3 м/с.

Понятие «пробка мутности» стало широко использоваться применительно к концепции маргинального фильтра [3] многими отечественными учеными для обозначения зон повышенной мутности с

существенно меньшими абсолютными значениями концентрации взвешенного вещества. Исследование особенностей гидрохимического и гидробиологического режимов приливных эстуариев невозможно без определения причин, механизмов и динамики зон повышенной мутности, которые в значительной степени определяют биоразнообразие и биопродуктивность эстуарных экосистем. Кроме того, аккумулирующиеся в «пробках» наносы часто могут являться источником загрязнения вод при переходе загрязнителей из адсорбированной формы в растворимую при контактах с соленой водой [4]. Дальнейшее изучение геохимического состава взвешенного вещества в эстуарных водах и локально в «пробках мутности» необходимо для определения источников поступления наносов и выявления пространственно-временной изменчивости мутности воды в эстуариях Мезени и Кулоя.

Исследование выполнено в ИО РАН в рамках темы Госзадания № FMWE–2024–0020.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: И.П. Матушкина, 2012. 452 с.
2. Демиденко Н.А. Динамика взвешенного вещества и процессы седиментации в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя // Известия РАН. Серия Географическая. 2022. Т. 86. № 6. С. 158–178. doi: [10.31857/S2587556622060048](https://doi.org/10.31857/S2587556622060048).
3. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С.735–747.
4. Савенко А.В., Демиденко Н.А., Покровский О.С. Пространственно-временная изменчивость трансформации стока растворенных веществ в эстуарии Мезени // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 216–226. doi: [10.31857/S0030-1574592216-226](https://doi.org/10.31857/S0030-1574592216-226).
5. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области Мезени и Кулоя / под ред. О.В. Горелиц, А.А. Сапожниковой, Ж.М. Куликовой. Воронеж: ООО «Юконь», 2024. 352с.

The current state of the hydrological regime in the Mezen and Kuloy estuaries is considered on the basis of specialized expeditionary research. In macrotidal estuaries with tides of more than 4 m, the bottom transfer of suspended sediments up the estuary occurs due to the asymmetry of the tidal current velocities. The mixing zone of river and sea waters functions as a kind of hydrodynamic and geochemical barrier, forming a marginal filter, separating the estuary and the adjacent coastline into areas with sharply different sedimentation conditions.

**Иванова Д.А.<sup>1,2</sup>, Саввичев А.С.<sup>2</sup>, Демиденко Н.А.<sup>3</sup>,  
Беленкова В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

<sup>2</sup>Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, г.

Москва, e-mail: [da.ivanova99@yandex.ru](mailto:da.ivanova99@yandex.ru); <sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва)

**Фитопланктон губы Кислой – водоема, отделенного от  
Баренцева моря дамбой приливной электростанции**

**Ivanova D.A.<sup>1,2</sup>, Savvichev A.S.<sup>2</sup>, Demidenko N.A.<sup>3</sup>,  
Belenkova V.V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>2</sup>Winogradsky Institute of Microbiology,

Research Centre of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow; <sup>3</sup>Shirshov

Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow)

**Phytoplankton of Kislaya Guba – a water body separated from  
the Barents Sea by dam of tidal power plant**

Ключевые слова: Кислая губа, фитопланктон, приливная электростанция, отделяющиеся водоемы

Исследовалась структура фитопланктона губы Кислой (бывший бассейн ПЭС) после возобновления водообмена с Баренцевым морем. Полученные зимой 2024 г. данные схожи с таковыми для Баренцева моря, что свидетельствует о начале процесса самовосстановления экосистемы залива.

Бассейн Кислогубской приливной электростанции (ПЭС) – это морской залив с узким горлом и подводным порогом. В середине и вершине залива – две впадины с глубиной до 37 м. Во время строительства и эксплуатации ПЭС проточный приливо-отливной режим в заливе был существенно нарушен, что привело к появлению в заливе придонных застойных вод, лишенных кислорода, и их сероводородному заражению. В 90-х годах XX века эксплуатация Кислогубской ПЭС прекратилась. Целью данного исследования было получение данных о структуре фитопланктона в подледной и придонной воде губы Кислой при возобновлении водообмена с Баренцевым морем.

Пробы фитопланктона отбирали с горизонтов 2 м и 34 м лимнологическим 1-литровым батометром, закрепленным на калиброванном тросе, через пробуренные во льду лунки зимой 2024 г. Пробы фиксировали формалином, концентрировали методом обратной фильтрации с использованием лавсановых мембран с диаметром пор 3 мкм до объема 50 мл, затем методом отстаивания с последующим декантированием до 5–10 мл. Клетки водорослей просчитывали в камере Нажотта на микроскопе МИКМЕД-6 при увеличении x200 и x400. Для расчета углеродной биомассы объемы клеток определяли методом

геометрического подобия [1] с последующим переводом в единицы углерода [2]. Современную классификацию водорослей приводили по электронной базе данных «World Register of Marine Species» [3].

На горизонте 2 м численность фитопланктона достигала 28 тыс. клеток/л (табл. 1), сырая биомасса – 32.6 мг/м<sup>3</sup>, углеродная биомасса – 2.3 мгС/м<sup>3</sup>. Было идентифицировано 18 видов водорослей, принадлежащих 4 отделам: Heterokontophyta (11 видов), Haptophyta (1), Myzozoa (5), Euglenozoa (1). В пробе встречались как морские планктонные виды, так и виды, вымываемые в толщу воды из льда. Преобладание в планктоне пениатных диатомей является основной стадией сукцессии во время цветения ледовой флоры [4, 5]. По биомассе доминировали диатомовые водоросли *Thalassiosira nordenskioldii* и *Navicula septentrionalis*, а также автотрофная динофлагеллята *Scrippsiella acuminata*.

Таблица 1. Структура фитопланктона на 2 м в губе Кислой

Вид	N, кл./л	B, мг/м <sup>3</sup>	В <sub>С</sub> , мгС/м <sup>3</sup>
Отдел Heterokontophyta Класс Bacillariophyceae			
<i>Chaetoceros socialis</i> H.S.Lauder	8308	0.93	0.11
<i>Cyclotella choctawhatcheeana</i> Prasad	769	0.10	0.01
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J.C.Lewin	154	0.07	0.01
<i>Fragilariopsis oceanica</i> (Cleve) Hasle	7692	1.18	0.13
<i>Licmophora</i> sp.	154	0.76	0.04
<i>Navicula septentrionalis</i> (Grunow) Gran	1692	7.31	0.43
<i>Navicula transitans</i> Cleve	769	0.85	0.07
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i> (Cleve) H.Peragallo	308	0.31	0.02
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve	3538	0.95	0.10
<i>Thalassiosira gravida</i> Cleve	154	2.90	0.13
<i>Thalassiosira nordenskioldii</i> Cleve	1692	8.67	0.50
Отдел Haptophyta Класс Coccolithophyceae			
<i>Gephyrocapsa huxleyi</i> (Lohmann) P.Reinhardt	462	0.02	0.003
Отдел Myzozoa Класс Dinophyceae			
<i>Gymnodinium</i> sp.	615	0.11	0.03

<i>Lebouridium glaucum</i> (Lebour) F.Gómez, H.Takayam, D.Moreira & P.López-García	308	0.58	0.11
<i>Peridiniella danica</i> (Paulsen) Y.B.Okolodkov & J.D.Dodge	308	0.65	0.12
<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech	154	0.11	0.03
<i>Scrippsiella acuminata</i> (Ehrenberg) Kretschmann, Elbrächter, Zinssmeister, S.Soehner, Kirsch, Kusber & Gottschling	1077	6.59	0.37
Отдел Euglenozoa Класс Euglenophyceae			
Неидентифицированная эвгленовая водоросль	154	0.47	0.06

На горизонте 34 м численность фитопланктона достигала около 1.8 тыс. клеток/л (табл. 2), сырая биомасса – 2.5 мг/м<sup>3</sup>, углеродная биомасса – 0.1 мгС/м<sup>3</sup>. В пробе обнаружено 8 видов, принадлежащих только к диатомовым водорослям.

Таблица 2. Структура фитопланктона на 34 м в губе Кислой

Вид	N, кл./л	B, мг/м <sup>3</sup>	В <sub>С</sub> , мг С/м <sup>3</sup>
Отдел Heterokontophyta Класс Bacillariophyceae			
<i>Chaetoceros socialis</i> H.S.Lauder	73	0.01	0.001
<i>Fragilariopsis oceanica</i> (Cleve) Hasle	876	0.13	0.01
<i>Fragilariopsis</i> sp.	292	0.26	0.02
<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C.Agardh	36	1.59	0.06
<i>Navicula transitans</i> Cleve	36	0.04	0.003
<i>Navicula</i> sp.	36	0.24	0.02
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve	401	0.11	0.01
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky	73	0.04	0.004

Значения сырой биомассы фитопланктона на обоих исследуемых горизонтах укладывались в диапазон значений, полученных для 0–50 м

пелагиали Баренцева моря в апреле 2016 г. (100–102 мг/м<sup>3</sup>) [6].

Таким образом, по качественным и количественным показателям фитопланктон губы Кислой в зимний период 2024 г. схож с аналогичными для Баренцева моря, и можно предположить, что после завершения работы ПЭС и частичного открытия шлюзов плотины начался этап самовосстановления экосистемы губы Кислая.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 25-24-00184, <https://rscf.ru/project/25-24-00184/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hillebrand H., Dürselen C.D., Kirschtel D. et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae // *Journal of phycology*. 1999. V. 35. № 2. P. 403–424.
2. Menden-Deuer S., Lessard E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45. № 3. P. 569–579.
3. Costello M.J., Bouchet P., Boxshall G. et al. Global coordination and standardisation in marine biodiversity through the World Register of Marine Species (WoRMS) and related databases // *PloS one*. 2013. V. 8. № 1. e51629.
4. Leu E., Mundy C.J., Assmy P. et al. Arctic spring awakening—steering principles behind the phenology of vernal ice algal blooms // *Prog. Oceanogr.* 2015. V. 139. P. 151–170.
5. van Leeuwe M.A., Tedesco L., Arrigo K. R. et al. Microalgal community structure and primary production in Arctic and Antarctic sea ice: a synthesis // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2018. V. 6. P. 4.
6. Макаревич П.Р., Олейник А.А. Фитопланктон Баренцева моря в весенний период: состав и структура в районе ледовой кромки // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. № 2–4 (44). С. 50–58.

We studied the phytoplankton structure in Kislaya Guba after the renewal of its water exchange with the Barents Sea. The winter 2024 data closely resembled that of the Barents Sea, suggesting the beginning of the ecosystem's natural recovery.

**Иглин С.М.<sup>1,2</sup>, Коробов В.Б.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва; <sup>2</sup>ФГУП «Росморпорт», г. Москва, e-mail: iglin.sm@bk.ru, <sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: korobov.vb@ocean.ru)

**Динамические характеристики волнения, уровня и течений в юго-восточной части Двинского залива Белого моря летом и осенью 2022 года (по данным инструментальных наблюдений)**

**Iglin S.M.<sup>1,2</sup>, Korobov V.B.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow; <sup>2</sup>FSUE “Rosmorport”, Moscow; <sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Dynamic characteristics of waves, levels, and currents in the southeastern part of the Dvinsky Bay of the White Sea in summer and autumn 2022 (based on instrumental observations)**

Ключевые слова: Двинский залив, Белое море, волнение, течения, уровень

В августе-ноябре 2022 г. в нескольких точках акватории юго-восточной части Двинского залива проводились инструментальные измерения волнения, течений, колебаний уровня, а также температуры воды, солёности и содержания растворенного кислорода. Эти сведения необходимы для обеспечения инженерных расчетов, проведения изысканий, разработки и верификации математических моделей гидродинамических процессов. Приведены наиболее общие сведения о волнении, течениях и уровнях, полученных в результате измерений.

**Введение.** Динамика вод в юго-восточной части Двинского залива, относящейся к акватории Архангельского порта, характеризуются чрезвычайно сложными условиями [1–5]. Обусловлено это одновременным действием метеорологических и гидрологических, прежде всего, приливами, факторов с дном и берегами, а в холодное время года и с ледяным покровом, с большим трудом поддающихся моделированию [6]. Поэтому существует настоятельная необходимость производить измерения для обеспечения инженерных расчетов, проведения изысканий, разработки и верификации моделей [7]. Такие серии натурных измерений были произведены летом и осенью 2022 г. Архангельским филиалом ФГУП «Росморпорт» в морской части акватории порта (рис. 1)

**Материалы и методы.** Измерения проводились донной станцией, представляющей профилометр течений RDCP 600 предназначенный для автоматических измерений горизонтальной и вертикальной скоростей, температуры водного потока и характеристик волнения. Попутно были измерены температура, солёность и содержание растворенного кислорода в придонном слое.

Сроки установки станции и проведения измерений указаны в таблице.

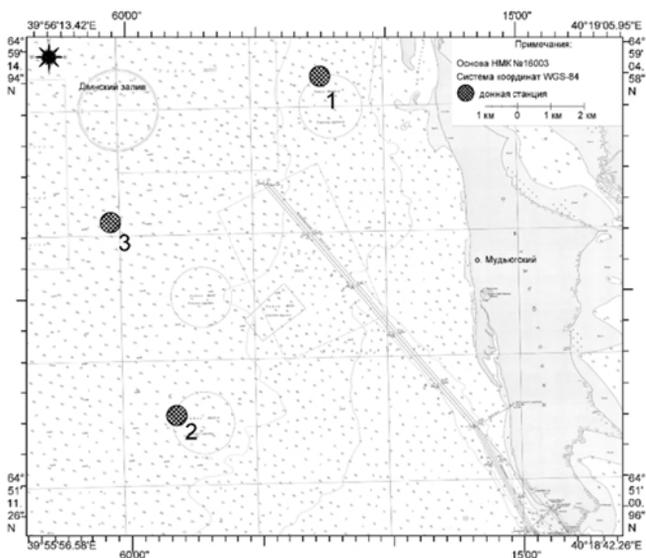


Рис. 1. Схема расположения точек измерения.

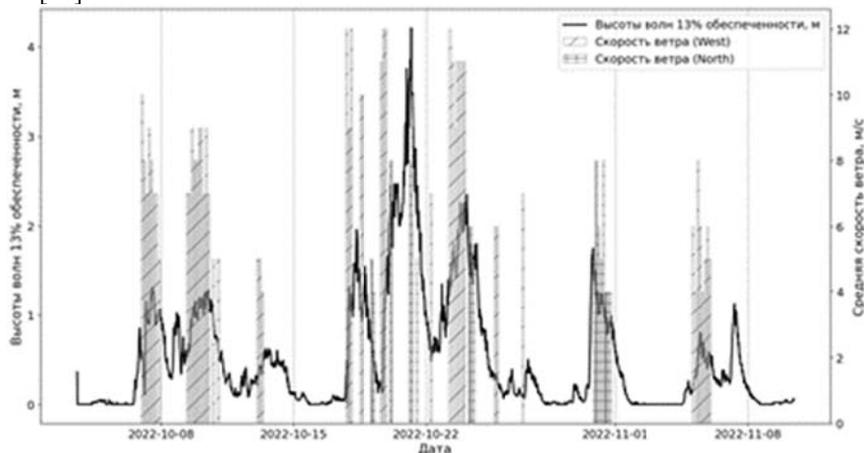
Таблица. Пространственно-временные характеристики размещения донных станций

№	Начало	Окончание	Широта (гр-мин-сек)	Долгота (гр-мин-сек)	Глубина, м
1	05.08.22	10.08.22	64-58-32.6	40-07-25.9	9.0
2	17.08.22	19.09.22	64-53-06.0	40-01-44.8	12
3	03.10.22	10.11.22	64-56-14.2	39-59-20.8	12.5

Камеральная обработка результатов проводилась в программном комплексе RCDP Studio, Golden Software Grapher, а также с помощью библиотек для анализа данных на языке Python (numpy, pandas, matplotlib). Анализ погодных условий был выполнен по архивным данным гидрометеостанции № 22551, расположенной на о. Мудьюгский, размещенных в сети Интернет [8] за период 01.05.2022–30.11.2022.

**Предварительные результаты.** *Ветровые волны.* Наибольшую ценность представляет волнение, т.к. измерения волн наиболее дефицитны. В результате измерений в судоходном канале порта Архангельск в районе к западу от о. Мудьюгский на глубинах 9–12 м наибольшие волны были зарегистрированы в середине октября при северо-западных и западных ветрах скоростью 16 м: значительные высоты волн (13% обеспеченности в системе волн) превышали 4 м (рис. 2). С учетом глубины места наибольшие высоты могли превышать величины значительных волн более, примерно, в два раза. Такие высокие волны в далеко не самом сильном шторме не

должны вызывать удивления: оценки сверху предельно возможных высот волн в Белом море при максимальных северо-западных ветрах более 30 м/с, в Двинском заливе на глубокой воде могут превышать 12 м и достигать почти 15 м [9]. Не удивительно, что в штормах при преобладающих ветрах западных румбов заносимость судоходного канала может доходить до 1 млн. м<sup>3</sup> [10].



**Рис. 2.** Высоты волн 13% обеспеченности в точке 3 и средние скорости северных и западных ветров.

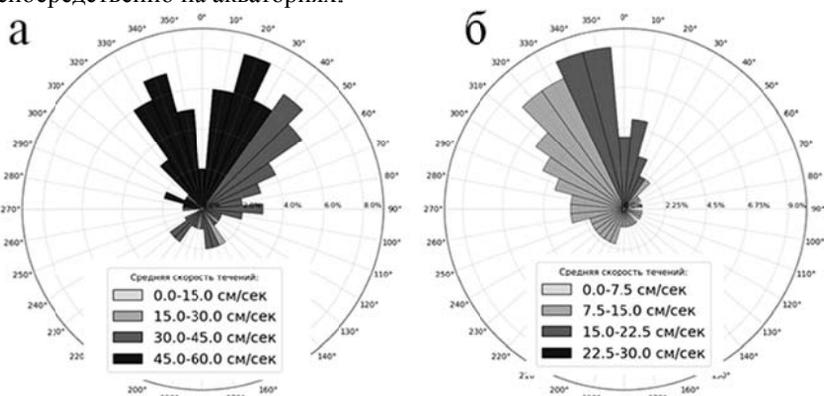
*Течения.* Скорость и направления течений измерялись на поверхностном, промежуточном и придонном горизонтах, что позволило более точно представить картину течений. При этом скорости течений несколько выше во время прилива и заметно выше на поверхностном горизонте по сравнению с придонным. Наибольшие скорости измерены во время прилива на поверхности моря: порядка 60 см/с, в то время как на отливе они не превышали 50 см/с. Также было установлено, что режим течений в районах измерений существенно зависит от ветрового воздействия даже на придонных горизонтах (рис 3).

*Колебания уровня.* Амплитуда колебаний уровня моря была относительно невелика – порядка 10 см, что не противоречит имеющимся представлениям о состоянии поверхности моря в этом районе в отсутствии нагонов и выраженных сейшевых колебаний.

**Заключение.** Помимо приведенных выше некоторых результатов, считаем необходимым сделать следующие замечания.

Измерения волнения и течений нет альтернативы, поскольку они не входят в состав наблюдений сети Росгидромета и необходимы для изучения межгодовой изменчивости гидрометеорологических характеристик, которые, как установлено в [11], имеют различные тренды, и для

корректировки коэффициентов регрессии, которых необходимы измерения непосредственно на акваториях.



**Рис. 3.** Скорости и направления течений на отливном цикле на поверхностном горизонте (а), на придонном горизонте (б) в точке 3.

Инструментальные измерения динамических характеристик морских вод особенно необходимы для интерпретации экологической ситуации, которая именно на акватории порта наиболее подвержена воздействию в устьевой области Северной Двины. Накопление таких данных позволит специалистам разного профиля углублять имеющиеся представления об экологической ситуации, которая пока еще не является полной [12, 13].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 241 с.
2. Гидрология устьевой области Северной Двины / Под ред. М.И. Зотина и В.Н. Михайлова. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
3. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
4. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Северная Двина / Под ред. Е.В. Борщенко, Е.А. Ракчеевой, О.В. Горелиц. Москва-Воронеж: ООО «ЮКОНЪ», 2022. 196 с.
5. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
6. Коробов В.Б., Шевченко В.П., Котова Е.И. Нерешенные задачи исследования устьевой области Северной Двины // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 125–138. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).6).
7. Иглин С.М., Коробов В.Б. Краткосрочное прогнозирование уровней моря

в морском порту Архангельск методами машинного обучения //Труды XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» (MARESEDU – 2024). Т. I (IV). Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2025. С. 96–103.

8. Сайт с архивными данными погоды на о. Мудьюгский [www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)

9. Коробов В.Б. О максимальных ветровых волнах в Белом море // Метеорология и гидрология. 1991. № 1. С. 86–91.

10. Иглин С.М., Алабян А.М., Коробов В.Б. Особенности штормовой заносимости канала Мудьюгских Башен в морском порту Архангельск в устье Северной Двины // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 648–659. doi:10.31857/S0030157422040037.

11. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979–2011 годах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2014. № 570. С. 50–87.

12. Иглин С.М., Котова Е.И., Коробов В.Б. Геоэкологическая оценка состояния вод и донных грунтов при проведении ремонтных работ в порту Архангельск // Естественные и технические науки. 2020. № 5(143). С. 76–87.

13. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129. DOI 10.17513/use.37402.

In August-November 2022, instrumental measurements of waves, currents, level fluctuations, as well as water temperature, salinity, and dissolved oxygen content were carried out at several points in the water area of the southeastern part of the Dvinsky Bay. This information is necessary to ensure engineering calculations, surveys, and the development and verification of mathematical models of hydrodynamic processes. The most general information about waves, currents and levels obtained as a result of measurements is given.

**Коченкова А.И., Стародымова Д.П., Лохов А.С.,  
Гордеев В.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: [kochen.a@mail.ru](mailto:kochen.a@mail.ru))

**Динамика твердого стока р. Северной Двины в период  
весеннего половодья в 2015–2025 гг.**

**Kochenkova A.I., Starodymova D.P., Lokhov A.S.,  
Gordeev V.V.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Dynamics of sediment runoff of the Severnaya Dvina River  
during the spring flood in 2015–2025.**

Ключевые слова: взвешенное вещество, Северная Двина, половодье, твердый сток

В устьевой области Северной Двины изучалось распределение массовой концентрации взвеси в период весеннего половодья в 2015–2025 гг. Средняя концентрация составила 17.2 мг/л, что в 2 раза превышает среднюю концентрацию за год. Средний твердый сток в половодье за период исследования составил  $61 \times 10^4$  т/мес.

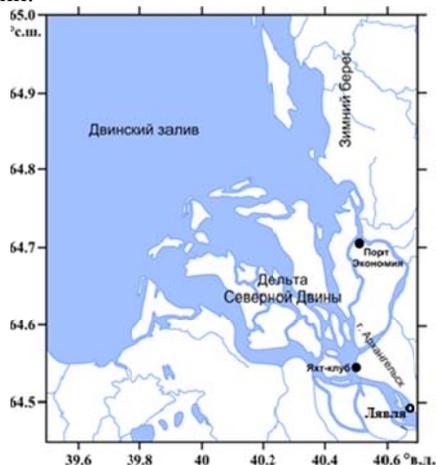
Комплексные исследования взвешенного вещества Белого моря были начаты по инициативе академика РАН А.П. Лисицына в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН [1–4]. В рамках этой программы в 2015 г. была открыта исследовательская станция «Обсерватория – Маргинальный фильтр р. Северной Двины» в г. Архангельск, на которой по настоящее время ведутся систематические исследования в устьевой области крупнейшей реки бассейна Белого моря, которая обеспечивает более 50% стока растворенных и взвешенных веществ в Белое море.

В работе приведены данные за период с 2015 по 2025 гг. по массовым концентрациям взвешенного вещества устьевой области р. Северной Двины в период весеннего паводка, когда максимального уровня достигают как водный сток, так и концентрация взвеси и твердый сток реки, превышая меженный в 2 и более раз [5].

Район исследований включает дельту Северной Двины. Пробы поверхностной воды отбирались каждый месяц на трех станциях нижнего течения реки (рис. 1): с причалов в черте горда Архангельска (Яхт-клуб) ( $n=102$ ), в порту Экономия в протоке Кузнечиха ( $n=12$ ) и у места впадения р. Лявля выше по течению г. Архангельск ( $n=7$ ). С 2021 г. пробы в период весеннего половодья отбирались с дискретностью 2 дня только на станции Яхт-клуб (в сумме 122 пробы за 2015–2025 гг.). Схема расположения станций показана на рис 1.

Поверхностные пробы отбирались пластиковым ведром на капроновом фале. В тот же день вода фильтровалась под вакуумом через мембранные ядерные фильтры с размером пор 0.45 мкм для определения массовой

концентрации (мг/л) взвеси и дальнейшего изучения ее состава. Каждая проба фильтровалась через три параллельных ядерных фильтра для надежного определения среднего значения. После фильтрации фильтры высушивались. Концентрацию взвеси определяли взвешиванием с точностью до 0.01 мг по разнице весов между фильтром с взвесью и его массой до фильтрации.



**Рис. 1.** Расположение станций отбора проб воды.

В работах [6–7] даны оценки потерь осадочного вещества в маргинальном фильтре реки, которые сильно зависят от сезона, особенно в области северной умеренной климатической зоны. Так, потери взвешенного вещества в мае достигают 80%. До 2021 г. такие оценки основаны на единичных образцах, отбор проб последних пяти лет выполнен с большой дискретностью, что позволяет подробно исследовать этот период года.

По литературным данным, средние значения концентрации взвеси р. Северная Двина в половодье варьируют от 9 до 16 мг/л (2000–2006 гг.) [8–9]. В исследуемый нами одиннадцатилетний период во время половодья массовая концентрация взвеси в устье Северной Двины заметно увеличивалась и варьировалась в широких пределах от 3.6 до 92.7 мг/л, составляя в среднем около 17.2 мг/л, что превышает среднегодовую концентрацию в 2 раза, но ниже среднегодовых значений, установленным для рек российской Арктики (около 36 мг/л) (таблица). За первое десятилетие текущего столетия (2000–2009 гг.) резко снизились оценки твердого стока — от  $4.4 \times 10^6$  т/г до  $0.81 \times 10^6$  т/г, по результатам работ ИО РАН по программе «Система Белого моря», и  $1.86 \times 10^6$  т/г по результатам наших исследований в 2015–2019 гг. [10]. Средний сток реки в половодье за десять лет составил  $35.8 \text{ км}^3/\text{мес.}$ , при этом твердый сток оценивается нами в  $61 \times 10^4$  т/мес.

Режим стока в период половодья определяется синоптическими условиями, прежде всего, ходом температуры воздуха и режимом жидких осадков, выпадающих в период снеготаяния и непосредственно после его окончания. Обычно половодье на реках бассейна Северной Двины проходит в виде одной резко выраженной волны стока, осложненной дополнительными пиками.

Таблица. Средняя концентрация взвешенного вещества р. Северной Двины в период весеннего паводка в 2015–2025 гг.

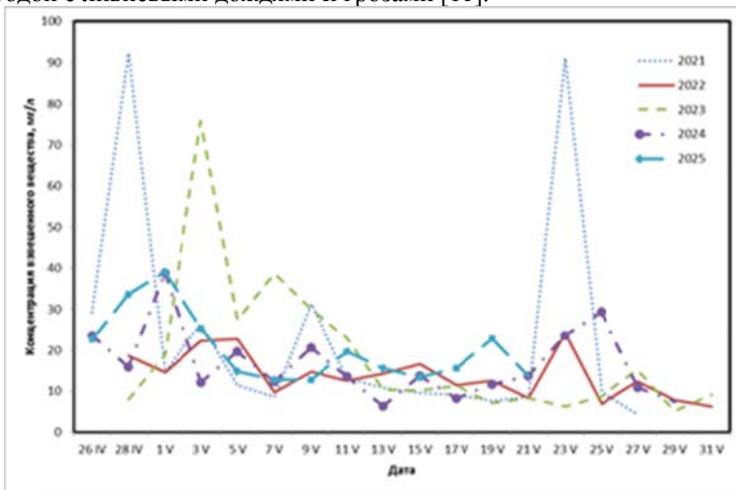
Год	Кол-во проб	Ср. конц., мг/л	Сток, км <sup>3</sup> /мес
2015	9	14	26.8
2016	5	34	35.9
2017	3	11	35.2
2018	4	14	39
2019	4	9.5	39.2
2020	7	17	47.4
2021	20	22	27.5
2022	18	14.5	н/д
2023	17	18.5	н/д
2024	17	16.6	н/д
2025	17	18.5	н/д

Распределение концентрации взвеси в течение половодья в 2021–2025 гг. показано на рис. 2. За этот период наблюдается два пика повышения концентрации. Максимальный пик в начале половодья связан с первой волной снеготаяния. Менее выраженные пики наблюдаются во второй декаде мая, когда, во-первых, идет вторая волна половодья за счет выхода волн половодья с трех бассейнов рек Сухоны, Ваги и Пинеги, а во-вторых, повышенная мутность из-за дождевых паводков после окончания снеготаяния.

Высокие значения концентрации взвеси (29.1–46.8 мг/л) были отмечены на станции порт Экономия в конце апреля начале мая 2016 г. с наступлением ледохода. Такие высокие концентрации в конце апреля связаны с повышенным температурным режимом, ускоренным снеготаянием, оттаиванием почвы. Ледоход в р. Северной Двине прошел на 7–20 дней ранее среднелетних сроков.

Максимальные концентрации взвеси зафиксированы в конце апреля 2021 г. (92.3 мг/л), что, как и в 2016 г., связано с ранним наступлением ледохода. При этом такие же высокие концентрации (91 мг/л) наблюдались 22 мая 2021 г., хотя за два дня до и после этой даты концентрация взвеси не превышала 10 мг/л, что может быть связано не только со второй волной половодья, но и с тем, что вторая декада мая характеризовалась жаркой

погодой с ливневыми дождями и грозами [11].



**Рис. 2.** Концентрация взвешенного вещества в устьевой области р. Северной Двины в период весеннего половодья в 2021–2025 гг.

Северная Двина – наиболее крупная река в бассейне Белого моря. Устьевые участки являются барьерами на пути выноса загрязняющих веществ в прибрежные зоны арктических морей [12]. Период весеннего половодья, когда максимален сток реки и вынос растворенных и взвешенных веществ, важен для оценки твердого стока и загрязнений, поступающих в море. По нашим данным концентрация взвешенного вещества (ср.=17.2 мг/л) превышает среднегодовое значение концентрации в два раза: максимальные значения достигают 92 мг/л, а средний твердый сток оценивается в  $61 \times 10^4$  т/мес.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СЗО ИО РАН за помощь в отборе и обработке образцов. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря / Под ред. академика РАН А.П. Лисицына, И.А. Немировской, В.П. Шевченко. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
2. Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера Белого моря / Под ред. академика РАН А.П. Лисицына, И.А. Немировской. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
3. Система Белого моря. Т. III. Рассеянный осадочный материал

гидросферы, микробные процессы и загрязнения / Под ред. академика РАН А.П. Лисицына, И.А. Немировской. М.: Научный мир, 2013. 668 с.

4. Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история / Под ред. академика РАН А.П. Лисицына, И.А. Немировской, В.П. Шевченко, В.Г. Воронцовой. М.: Научный мир, 2017. 1030 с.

5. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др. Вещественный состав водной взвеси устья реки Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.

6. Гордеев В.В., Коченкова А.И., Лохов А.С. и др. Сезонные и межгодовые вариации концентраций и стоков растворенных и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белое море // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 41–55

7. Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В. и др. Особенности сезонного распределения взвеси и органического углерода по данным обсерватории "Маргинальный фильтр реки Северная Двина" // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 2. С. 96–111.

8. Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М.: И.П. Матушкина, 2012. 452 с.

9. Шевченко В.П., Филиппов А.С., Богунов А.Ю. и др. Геохимические исследования взвеси в маргинальном фильтре реки Северная Двина в конце зимнего периода // Вестник Архангельского гос. техн. ун-та. Сер. «Прикладная геоэкология». 2007. Вып. 70. С. 164–176.

10. Гордеев В.В., Шевченко В.П., Новигатский А.Н. и др. Переходная зона река–море (маргинальный фильтр) Северной Двины как эффективная ловушка речного осадочного материала на пути в открытую область Белого моря // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С. 260–270.

11. Обзор гидрометеорологических условий на территории Архангельской области URL <http://www.sevmeteo.ru/weather/gidro/2689/>

12. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

In the estuary region of the Severnaya Dvina, the distribution of the mass concentration of suspended matter during the spring flood in 2015–2025 was studied. The average concentration was 17.2 mg/l, which is 2 times higher than the average concentration for the year.

**Краснова Е.Д.<sup>1</sup>, Воронов Д.А.<sup>2</sup>, Жильцова А.А.<sup>3</sup>,  
Иванова Д.А.<sup>1</sup>, Лабунская Е.А.<sup>1</sup>, Миндолина Ю.В.<sup>4</sup>,  
Пацаева С.В.<sup>3</sup>, Плотников А.О.<sup>4</sup>, Соколовская Ю.Г.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: e\_d\_krasnova@mail.ru; <sup>2</sup>Институт проблем передачи информации РАН, Москва; <sup>3</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; <sup>4</sup>Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, г. Оренбург)

### **Функциональное зонирование экосистемы прибрежного меромиктического озера Трехцветное**

**Krasnova E.D.<sup>1</sup>, Voronov D.A.<sup>2</sup>, Zhiltsova A.A.<sup>3</sup>, Ivanova D.A.<sup>1</sup>,  
Labunskaya E.A.<sup>1</sup>, Mindolina Yu.V.<sup>4</sup>, Patsaeva S.V.<sup>3</sup>,  
Plotnikov A.V.<sup>4</sup>, Sokolovskaya Yu.G.<sup>3</sup>**

(<sup>1</sup>Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>2</sup>Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow; <sup>3</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow; <sup>4</sup>Institute for Cellular and Intracellular Symbiosis of the Ural Branch of the RAS, Orenburg)

### **Functional zoning of the ecosystem of the coastal meromictic lake Trekhtzvetnoe**

Ключевые слова: меромиксия, Белое море, планктон, вертикальное распределение, факторы среды, хемоклин, аноксия, соленость, световой климат

Подытожены результаты 15 лет наблюдений за гидрологической структурой и составом планктонных сообществ в прибрежном меромиктическом озере Трехцветное (Белое море, Кандалакшский залив). Определены основные факторы, влияющие на вертикальную экологическую структуру водоема, описана последовательность экологических микро nich с характерными видами-индикаторами.

В России известно 54 меромиктических водоема, из которых более половины (32) – прибрежные. Лучше всего обследовано беломорское побережье, где найдено 15 [3] и несколько из них с 2010 г. охвачено регулярными наблюдениями. В их числе озеро Трехцветное на берегу Ругозерской губы (Кандалакшский залив) в 7 км к северо-западу от Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова (66°35'31.60"С, 32°58'45.39"В). На протяжении 15 лет в нем проводятся круглогодичные наблюдения за гидрологической структурой и составом экологических сообществ. Накопленные данные позволили определить основные факторы, влияющие на вертикальную структуру водоема, выявить вертикальную последовательность экологических ниш с характерными видами-индикаторами и составить подробную схему экологической зональности.

Площадь озера Трехцветное 3.2 га, максимальная глубина 7.5 м, площадь

водосборного бассейна 64.4 га. Оно образовалось из морского залива в результате послеледникового поднятия берега. Современное русло стока проходит над каменистым порогом, поднявшимся выше уровня максимального прилива (0.8581 м по балтийской системе), который препятствует забросам морской воды и задерживает пресную воду. В результате сложилась гидрологическая структура из пресного миксолимниона – поверхностного слоя воды, которым ограничено вертикальное перемешивание, реликтовой морской воды в нижней части озерной чаши – монимолимниона с соленостью, близкой к беломорской, и градиентной зоны между ними – хемоклина. Монимолимнион сульфидный с содержанием сероводорода до 600 мг/л [7]. В хемоклине массово развиваются зеленые серные бактерии *Chlorobium phaeovibrioides*, осуществляющие аноксигенный фотосинтез с использованием сероводорода [8, 11]. Пресный поверхностный слой воды имеет характерный для торфяных болот темно-коричневый цвет, прослойка с серными бактериями – мутно-зеленая, в монимолимнионе вода лимонно-желтая, из-за чего озеро получило свое название.

Вертикальная экологическая зональность оз. Трехцветное определяется градиентами нескольких абиотических параметров, в числе которых соленость воды, определяющая меромиктическую структуру озера, диапазон изменчивости температуры воды, уменьшающийся с глубиной, ослабление света при прохождении сквозь коричневатую воду миксолимниона и изменение его спектрального состава. Кроме того, первичную гидрологическую структуру модифицируют биологические факторы: бактериальная сульфатредукция и бактериальная пластина из аноксигенных фотосинтетиков, не пропускающая свет глубже.

На примере одноклеточных эукариот [10] показано, что в пелагиали оз. Трехцветное существует три сообщества, соответствующие трем зонам с разной соленостью: 1) «миксобийонты» – организмы, населяющие миксолимнион, 2) «клинобийонты», приуроченные к зоне с физико-химическими градиентами и 3) «монимобийонты» – постоянные обитатели анаэробной зоны. К характерным представителям «миксобийонтов» относятся зеленая водоросль *Monoraphidium contortum*, динофлагеллята *Ceratium hirundinella*, диатомеи *Urosolenia longiseta* и *Ulnaria ulna*, золотистые водоросли *Dinobryon divergens* и *Synura curtispina*. Сюда также можно отнести коловраток *Anueropsis fissa*, *Filinia longiseta*, *Gastropus stylifer*, *Keratella cochlearis*, *Brachionus angularis* и *Polyarthra* sp., которые ежегодно в массе размножаются в миксолимнионе оз. Трехцветное.

«Клинобийонты» среди фитопланктона: зеленые водоросли *Scourfieldia cordiformis*, образующие плотную популяцию на глубине 1.8 м, несколько видов пеннатных диатомей (*Navicula rhynchocephala*, *Neidium ampliatum*, *Opephora mutabilis*, *Nitzschia* cf. *incognita* и ее эпифит *Pseudostaurosira parasitica*), присутствие которых в хемоклине, вероятно, связано с их

способностью использовать скачок плотности как ложное дно, гетеротрофные жгутиконосцы *Collodictyon*, солнечники *Rainieriophrys erinaceoides* и несколько видов инфузорий, из которых наиболее типичны для этого водоема *Coleps* sp. и *Paramecium* sp. Распределение инфузорий указывает на существование микропиш в масштабе нескольких см по вертикали [1]. С 2014 по 2020 гг. в хемоклине в массе обитали *Euglena* sp. Миксотрофы в целом характерны для хемоклина стратифицированных водоемов; в оз. Трехцветное, в хемоклине часто в массе развиваются криптофитовые водоросли, среди которых много миксотрофов. Миксотрофность свойственна некоторым инфузориям, в частности – *Coleps*, в клетках которых мы всегда видим зеленых эндосимбионтов. Из многоклеточных организмов к хемоклину бывают приурочены способные жить в солоноватой воде коловратки *Keratella quadrata*, а также *Synchaeta* sp. Среди представителей этого рода есть не только пресноводные, но и морские виды и во многих прибрежных меромиктических озерах они приурочены именно к хемоклину, достигая там огромной численности [4]. В хемоклине также обычно концентрируются ветвистоусые рачки *Bosmina longirostris*, привлеченные обилием водорослей и бактерий: в их кишечниках видна флуоресценция хлорофилла «а», а в ацетоновых экстрактах из этих рачков зарегистрирован оптический сигнал бактериохлорофилла, входящего в состав зеленых серных бактерий [6].

В соленой части водной толщи, поскольку она анаэробная, могут существовать только анаэробные организмы, в частности – гетеротрофные жгутиконосцы *Carpodimonas* sp., которые встречаются в сульфидной зоне и других беломорских меромиктических водоемов.

Главный вертикальный тренд – уменьшение диапазона сезонных колебаний температуры от поверхности к глубине. Зона ветрового перемешивания до глубины 0.5–1 м характеризуется максимальными сезонными колебаниями температуры от 0°C в период ледостава до 25°C летом. На глубине 1.5 м этот диапазон почти вдвое меньше (2.3–16.6°C), на 3 м – от 5.1 до 9.4°C, на 4 м – колебания температуры составляют всего 1.4°C, а вблизи дна на глубине 6–7 м температура +6°C постоянна весь год. Сезонный прогрев в нижних слоях воды происходит значительно позже, чем в поверхностном слое. Например, в 2024 г. у поверхности максимум температуры был отмечен в конце июля, на глубине 1 м – на месяц позже, на глубине 2 м он отставал еще на 1 месяц, на 3 м – в октябре, на 4–5 м был в январе, а до глубины 6 м волна тепла доходит лишь в конце зимы. Динамичный тепловой режим поверхностного слоя создает условия для сезонной сукцессии в планктонном сообществе, тогда как в стабильных условиях глубоких слоев качественный состав и количественные характеристики сообществ более постоянные. Большинство видов присутствует там непрерывно годами, например, инфузории *Coleps* и *Paramecium*, у самого массового вида микроводорослей *Scourfeldia*

*cordiformis* вегетация длится несколько месяцев, а у *Euglena* sp. она длилась несколько лет без зимнего перерыва [5].

Доступность биогенных элементов – основное условие развития первичных продуцентов, в том числе фитопланктона. Ввиду отсутствия рециркуляции из глубинных вод и донного осадка преобладающий поток биогенных элементов направлен из аэробной зоны в анаэробную, где происходит накопление оседающей органики и ее активная деструкция. Обратное движение биогенов ограничено диффузией из анаэробной зоны, что делает хемоклин своего рода «оазисом» для фототрофов, от которых требуется теневыносливость и устойчивость к небольшим концентрациям сероводорода, также диффундирующего снизу.

Для фотосинтезирующих организмов условия обитания на разной глубине различаются, в первую очередь световыми условиями. Темная торфяная вода сильно ослабляет свет: уже в первых 0.5 м теряется от 80 до 96% световой энергии, до глубины 1 м доходит 1–5% света, а до глубины 2 м – лишь сотые доли процента. Меняется и спектральный состав света. Гуминовые вещества, которые придают воде коричневый цвет, поглощают коротковолновую часть солнечного спектра, а вода – длинноволновую, из-за чего с глубиной спектр сужается. Если на глубине 0.5 м в этом водоеме диапазон широкий, от голубого до красного (475–720 нм), то на 1.5 м сдвигается только оранжевый и красный (580–700 нм). Это хорошо объясняет, почему в этом озере аноксигенные фототрофы представлены зеленоокрашенной формой зеленых серных бактерий [2]: их пигменты лучше всего поглощают свет именно в этом диапазоне. Различия в освещенности и спектральном составе света на разной глубине создают предпосылки для сегрегации светолубивых таксонов, которые тяготеют к поверхности, от теневыносливых, приуроченных к хемоклину. Возле самой поверхности, где освещенность максимальная и самый широкий спектральный диапазон, концентрируются колонии золотистых водорослей *Uroglena*, требовательных к свету и чистоте воды и, в меньшем количестве, *Dinobryon divergens*. При красном освещении в хемоклине способны существовать зеленые водоросли с хлорофиллом и криптофитовые водоросли с фикобилинами синего цвета.

Водная толща оз. Трехцветное делится на верхнюю аэробную и нижнюю сульфидную зоны. Сероводород образуется в результате деятельности бактерий-сульфатредукторов [11]. Граница между аэробной и анаэробной зонами находится в освещенной части озера, что благоприятствует развитию аноксигенных фототрофных бактерий. Высокоплотное сообщество зеленых серных бактерий в этом водоеме характеризуется высокой продуктивностью. Скорость ассимиляции углекислоты в нем в сентябре 2013 и 2014 гг. в 5-6 раз превышала такую же оксигенного фотосинтеза фитопланктона в вышележащей водной массе [11]. Роль аноксигенных фототрофов в синтезе первичной продукции в

меромиктических водоемах очень велика. Вопрос о том, в какой мере ее могут использовать организмы аэробной зоны, важен для понимания цикла углерода. Зеленых серных бактерий могут поселять некоторые представители зоопланктона [6], есть предположение об их участии в пищевых цепях через миксотрофных простейших.

Анаэробная зона оз. Трехцветное, как и в других водоемах с сульфидной аноксией, служит рефугиумом бактериального сообщества, аналогичного тому, которое существовало на Земле в Архее до того, как в атмосфере появился кислород. Там обнаружено 90 родов прокариот и таксонов более высокого ранга [11].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-24-00008 (<https://rscf.ru/project/24-24-00008/>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Д.А., Краснова Е.Д. Исследования мелкомасштабного распределения микроорганизмов в хемоклине прибрежных стратифицированных водоемов, отделяющихся от Белого моря // Тр. VII Междун. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». Т. 4. Тверь: ПолиПРЕСС, 2019. С. 103–107.
2. Жильцова А.А., Филиппова О.А., Краснова Е.Д., и др. Сравнительный анализ спектральных методов определения концентрации бактериохлорофилла *d* зеленых серных бактерий в воде // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 4. С. 312–318.
3. Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322–333.
4. Краснова Е.Д., Воронов Д.А. Влияние хемоклина на вертикальную неоднородность зоопланктона в прибрежных стратифицированных водоемах, отделившихся от Белого моря // Тр. X Междун. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)». Т. 2. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2022. С. 82–86.
5. Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Лабунская Е.А. Повторяемость планктонных сообществ в меромиктических водоемах на побережье Белого моря по данным многолетнего мониторинга // Тр. XIII Междун. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)». Т. 3. М.: ПРО-ПРЕСС, 2025. С. 129–138.
6. Краснова Е.Д., Жильцова А.А., Пацаева С.В. Феномен питания ветвистоусых рачков *Bosmina longirostris* аноксигенными фототрофными бактериями из хемоклина в меромиктическом озере Трехцветном (Ругозерская губа, Кандалакшский залив, Белое море) // Тр. VII Междун. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». Т. 4. Тверь: ПолиПРЕСС, 2019. С. 150–153.
7. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение

прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 401–412.

8. Лунина О.Н., Саввичев А.С., Бабенко В.В. и др. Сезонные изменения структуры сообщества аноксигенных фототрофных бактерий меромиктического озера Трехцветное (Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2019. Т. 88. № 1. С. 100–115.

9. Krasnova E., Matorin D., Belevich T. et al. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2018. V. 6. P. 1–16.

10. Mindolina Yu.V., Krasnova E. D., Ivanova D.A. et al. Species Richness and Taxonomic Composition of Protists in the Arctic Meromictic Lake Trekhtzvetnoe // Protistology, в печати.

11. Savvichev A., Babenko V., Lunina O. et al. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake Trekhtzvetnoe // Environmental Microbiology and Environmental Microbiology Reports. 2018. V. 20(10). P. 3784–3797.

The results of 15 years of observations of the hydrological structure and plankton communities composition in the coastal meromictic lake Trekhtzvetnoe (White Sea, Kandalaksha Bay) are summarized. The main factors influencing the vertical ecological structure of the lake are determined; the sequence of ecological niches with characteristic indicator species is described.

**Мискевич И.В.<sup>1,2</sup>, Калашников А.В.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

[szoioras@yandex.ru](mailto:szoioras@yandex.ru); <sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск)

**Статистическая характеристика содержания мышьяка и металлов в донных отложениях центральной части устьевого взморья реки Северной Двины**

**Miskevich I.V.<sup>1,2</sup>, Kalashnikov A.V.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; <sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk)

**Statistical characteristics of arsenic and metal content in sediments of the central part of the Northern Dvina River estuary**

Ключевые слова: Белое море, Северная Двина, взморье, металлы, донные отложения, сезоны, статистика

Исследованы статистические параметры изменчивости содержания мышьяка и таких металлов, как кадмий, марганец, медь, никель, свинец, хром и цинк, в донных отложениях центральной части устьевого взморья реки Северной Двины в Белом море. Выявлено наличие тенденции к понижению их содержания от весны к осени. Это указывает на доминирующую роль речного стока в накоплении металлов в донных отложениях на коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра устьевой области реки. Соотношение различных статистик в изменчивости исследуемых показателей позволяет предположить об отсутствии значимого техногенного вклада в загрязнение экосистемы устьевого взморья Северной Двины мышьяком и металлами.

Для Белого моря характерна значительная пространственная изменчивость содержания металлов в донных отложениях устьевых областей рек, что связано с большим разнообразием геологических условий его прибрежных территорий и наличием техногенных источников поступления различных металлов на водосборах его рек. Достоверная оценка подобной изменчивости имеет важное значение для решения широкого спектра научных и прикладных геоэкологических задач. Данная проблема особенно актуальна для устьевой области р. Северной Двины, учитывая объем ее стока и нахождением здесь мощного промышленно-транспортного узла, сформированного из городов Архангельск, Северодвинск и Новодвинск.

В рамках решения вышеуказанной проблемы был выполнен статистический анализ содержания мышьяка и таких металлов, как кадмий, марганец, медь, никель, свинец, хром и цинк в донных отложениях устьевого взморья р. Северной Двины. Эта часть устья реки имеет

квазитреугольную форму и представляет собой мелководную часть Двинского залива, сложенную речными наносами, в которой хорошо прослеживается влияние речных вод. Здесь преобладают глубины в диапазоне 3–12 м. Его речной границей является морской край дельты, т.е. замыкающие створы Никольского, Мурманского и Корабельного рукавов. Морская граница взморья, за которую принят свал глубин, представляет собой дугу, концы которой находятся у устья р. Солзы (в западной части) и д. Куя (в восточной части) [1].

Для статистических расчетов были выбраны 2 станции, расположенные в центральной части устьевого взморья реки вне зон влияния операций по дамплингу грунта. Последнее делает сток р. Северной Двины доминирующим фактором в формировании высоких концентраций содержания металлов в донных отложениях зоны смешения речных и морских вод. Средняя соленость поверхностных вод на участке расположения вышеупомянутых станций весной колеблется в диапазоне 0.5–8.5‰, в летне-осеннюю межень – 15–18‰. Для придонных слоев этого участка в течение всего года типична соленость в интервале 20–25‰ [1]. Таким образом, можно предположить, что статистический анализ покажет изменчивость содержания мышьяка и металлов в донных отложениях коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра устья р. Северной Двины.

Анализ проб донных отложений для определения содержания металлов осуществлялся в аттестованной Испытательной лаборатории Архангельского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужба» по методике ФР.1.31.2012.13573, для мышьяка – согласно «Методическим указаниям по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом» (Москва, ЦИНАО, 1993).

При проведении статистического анализа рассчитывались как традиционные статистические показатели (среднеарифметическое значение и стандартное отклонение), так и робастные («помехоустойчивые») параметры: медиана, трехсреднее значение и межквартильный размах. Они показывают наибольшую эффективность при анализе коротких выборок данных с наличием «выбросных» величин [2–5].

Полученные результаты отражены в таблицах 1–2. В качестве характерного диапазона изменчивости содержания мышьяка и металлов в донных отложениях можно ориентироваться на интервал значений, заключенный между квартилями  $C_{25\%}$  и  $C_{75\%}$ . Здесь следует заметить, что средняя концентрации кадмия, а также его медианное и трехсреднее значение, в отобранных пробах донных отложений были меньше чувствительности применяемого метода химического анализа ( $< 0.05$  мг/кг).

С учетом расхождения между средними значениями и медианами можно предположить наличие удлинённых «хвостов» в статистическом распределении концентраций только для никеля мышьяка. Это, в свою

очередь, позволяет предположить о заметном вкладе антропогенных факторов в накопление данных элементов в донных отложениях устьевого взморья р. Северной Двины. Для них в качестве статистического центра распределения концентраций, вместо среднего значения ( $C_{\text{ср.}}$ ) рекомендуется использовать трехсреднее значение ( $C_{3\text{ср.}}$ ).

Таблица 1. Статистические параметры изменчивости содержания мышьяка и металлов в донных отложениях (мг/кг) на устьевом взморье р. Северной Двины весной в период 2019–2023 гг.

Параметры	Mn	Cu	As	Ni	Pb	Cr	Zn
$C_{\text{ср.}}$	89.80	6.90	7.03	57.5	4.64	2.50	30.10
$\sigma$	32.01	1.63	1.22	101.9	1.80	0.52	19.76
$C_{\text{м}}$	102.00	7.10	6.70	31.0	4.65	2.60	36.50
$C_{3\text{ср.}}$	99.69	6.95	6.77	28.3	4.81	2.51	33.63
$C_{25\%}$	86.00	5.73	6.10	17.5	3.65	2.05	14.00
$C_{75\%}$	108.75	7.88	7.58	33.5	6.30	2.78	47.50
H	22.75	2.15	1.48	16.0	2.65	0.73	33.50
$C_{\text{макс.}}$	119.00	9.80	9.30	345.0	6.80	3.40	52.00
$C_{\text{мин.}}$	28.00	4.50	5.80	6.5	1.70	1.80	2.50
N	10	10	10	10	10	10	10

Таблица 2. Статистические параметры изменчивости содержания мышьяка и металлов в донных отложениях (мг/кг) на устьевом взморье р. Северной Двины осенью в период 2019–2023 гг.

Параметры	Mn	Cu	As	Ni	Pb	Cr	Zn
$C_{\text{ср.}}$	83.30	5.99	5.42	23.1	3.78	1.73	33.28
$\sigma$	32.80	2.27	1.49	18.0	2.48	0.74	24.25
$C_{\text{м}}$	98.50	7.15	5.80	32.5	5.25	1.85	39.50
$C_{3\text{ср.}}$	92.63	6.54	5.77	26.0	4.50	1.89	36.03
$C_{25\%}$	72.50	3.95	5.50	4.0	1.70	1.65	9.10
$C_{75\%}$	101.00	7.90	5.98	35.0	5.80	2.22	56.00
H	28.50	3.95	0.48	31.0	4.10	0.57	46.90
$C_{\text{макс.}}$	111.00	7.90	7.70	44.0	5.90	2.60	58.00
$C_{\text{мин.}}$	23.00	1.90	2.30	0.6	0.12	0.23	2.50
N	10	10	10	10	10	10	10

Необходимо отметить, что наибольшее содержание в донных отложениях устьевого взморья р. Северной Двины весной и осенью фиксируется для марганца и цинка, что соответствует объемам выноса этих металлов со стоком р. Северной Двины [5]. В донных отложениях концентрации никеля на порядок превышают концентрации меди, что не соответствует

соотношению данных металлов в величинах выноса с речным стоком в Двинский залив. Наиболее вероятной причиной подобной аномалии служит аэротехногенное загрязнение водосбора устьевой области р. Северной Двины со стороны промышленных предприятий Кольского полуострова [6].

Зафиксированная сезонная изменчивость содержания металлов в донных отложениях устьевого взморья, в первую очередь, связана с активными литодинамическими процессами, характерными для рассматриваемого района устья р. Северной Двины. Они, в свою очередь, зависят от интенсивности весеннего и осеннего паводков реки, а также от штормовых условий. При доминирующем тренде миграции металлов с влекомыми наносами в центральную глубоководную часть Двинского залива, их часть с взвесью при штормовых ветрах северных румбов может попадать в дельту Северной Двины [7]. Определенную роль в сезонном выведении металлов с донных отложений рассматриваемого района может также играть макрозообентос - двустворчатые моллюски (доминирующий по биомассе вид для устьевого взморья) и олигохеты. Они в свою очередь, здесь активно потребляются речной и полярной камбалой, которые являются основными объектами любительского лова рыбы на устьевом взморье р. Северной Двины.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гидрология устьевой области Северной Двины. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
2. Тьюки Д. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. М.: Мир, 1981. 688 с.
3. Микулинская С.М., Рожков В.А. Обработка малых выборок // Режимобразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 167–176.
4. Мискевич И. В. Гидрохимия приливных устьев рек: методы расчетов и прогнозирования : автореферат дис. ... доктора географических наук : 25.00.28. Рос. гос. гидрометеорол. ун-т (РГГМУ). СПб, 2005. 50 с.
5. Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д. и др. Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.
6. Татаринцева В.Г., Котова Е.И. Аэротехногенное загрязнение водно-болотных объектов водосбора Белого моря (на примере Архангельской области) // Географический вестник - Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 135150.
7. Иглин С.М., Котова Е.И., Коробов В.Б. Геоэкологическая оценка

состояния вод и донных грунтов при проведении ремонтных дноуглубительных работ в порту Архангельск // Естественные и технические науки. 2020. №. 5. С. 76–87.

Statistical parameters of variability in arsenic and metals (cadmium, manganese, copper, nickel, lead, chromium, and zinc) content in bottom sediments of the central part of the Northern Dvina estuary in the White Sea were studied. A trend towards their content decrease from spring to autumn was revealed. This indicates the dominant role of riverine runoff in metal accumulation in bottom sediments at the coagulation-sorption stage of the river mouth marginal filter. The ratio of different statistics in the variability of the studied indicators suggests the absence of a significant anthropogenic contribution to the pollution of the Northern Dvina estuary ecosystem with arsenic and metals.

**Мосеев Д.С., Лещев А.В., Мискевич И.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: viking029@yandex.ru)

**Особенности накопления наносов на литорали юго-восточного побережья Онежского залива Белого моря**

**Moseev D.S., Leshchev A.V., Miskevich I.V.**

(Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy Sciences, Moscow)

**Special features of sediment accumulation on the south-eastern coast littoral of the of the Onega Bay of the White Sea**

Ключевые слова: наносы, литораль, приморские фитоценозы, Белое море.

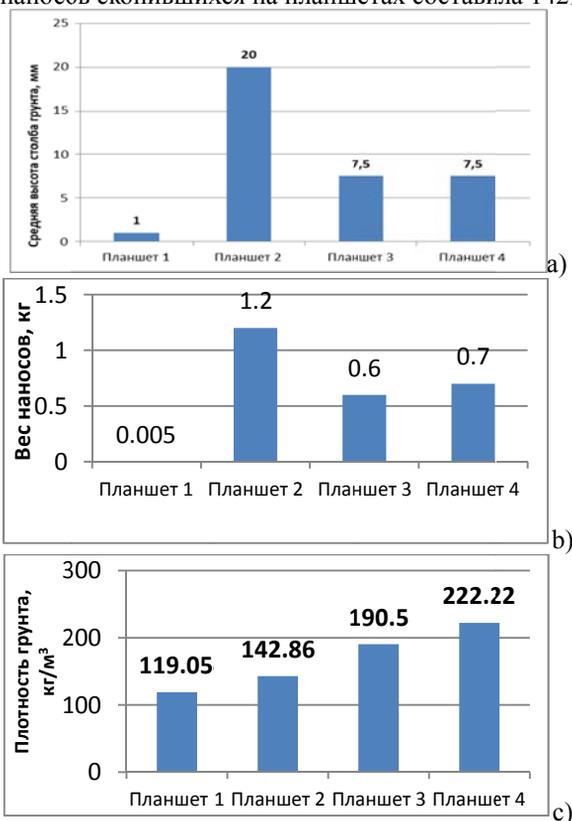
Накопление наносов изучалось в Онежском заливе Белого моря в летне-осенний период методом установки илонакопителей в приливо-отливной зоне. Активное накопление наносов наблюдается в сообществах фукусов на средней литорали. Очень слабое накопление отмечено в сообществе тростника на верхней литорали.

Седиментация прибрежно-морских наносов остается открытым вопросом при изучении формирования и динамики берегов. На осадконакопление в приливной зоне эстуариев влияют: морфология устья, воздействие прибоа, скорости и направления течений как в устьях рек, так и морских, в том числе, приливных течений [1, 2]. Другим фактором, участвующим в процессах образования берегов и накопления наносов, является продуктивность и видовой состав организмов [2], а также приморской растительности. Сообщества водорослей-макрофитов способствуют накоплению наносов на низких приливных берегах [2–4], на принос которых во многом влияет приливо-отливный цикл. Другими словами, приморская растительность инициирует накопление наносов в береговой зоне.

На берегах, закрытых от волноприбойного воздействия, нами уже с 2017 г. проводятся исследования процессов накопления наносов в южной части Онежского залива Белого моря [5, 6]. Изначально для измерения величины накопившихся наносов в приливо-отливной зоне устанавливались гидрометрические рейки длиной 50–70 см. Несмотря на то, что при постановке реек не исключены различного рода случайные ошибки (проседание рейки под грунт, вихревые движения воды, приводящие к размыванию грунта рядом с рейкой), некоторые данные все же можно учитывать. Исследования, проведенные с рейками, показывают накопление ила до 0.5 см высотой над нулевой отметкой в сомкнутых сообществах тростника обыкновенного (*Phragmites australis*) и клубнекамыша морского (*Bolboschoenus maritimus*) [5].

В конце мая 2024 г. в приливо-отливной зоне закрытого берега южной части Онежского залива у мыса Пильемский и в устье р. Пильемы

(64.025840° с.ш. 38.048060° в.д.) были установлены илонакопители. Они представляют собой планшеты площадью 0.42 м<sup>2</sup> с бортами высотой 5 см. Измерения накопления наносов были проведены в августе, через 2.5 месяца после установки илонакопителей. Результаты накопления наносов на приустьевом участке р. Пильемы и у мыса Пильемский существенно варьировали (рис. 1). В тростниковом сообществе устья р. Пильемы (планшет 1) на уровне влияния сизигийных приливов наблюдалось очень слабое накопление наносов высотой столба грунта не более 1 мм. Напротив, на участках средней литорали рядом с мысом Пильемский в сообществах бурой водоросли *Fucus distichus* наблюдалось почти сплошное заиление илонакопителей. Здесь средняя высота отложений наносов составила 7.5–20 мм (илонакопители: планшет № 2 – 10–30 мм, планшеты № 3, № 4 – 5–10 мм), а масса наносов скопившихся на планшетах составила 1429–2857 г/м<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Данные по накоплению наносов на литорали Онежского залива. Планшет № 1 – илонакопитель в устье р. Пильемы. Сообщество тростника в зоне влияния сизигийных приливов. Планшеты №№ 2, 3, 4 – илонакопители

у мыса Пильемский: № 2 и № 3 в сообществах фукусовых водорослей, 2 раза сутки заливаемые приливом, № 4 – в сообществе тростника на средней литорали.

На всех участках литорали при разнице в весе и высоте столба грунта, наблюдалась высокая плотность наносов, что указывает на преобладание илистых частиц в составе грунта (рис. 1с).

Слабое осаждение наносов в устье реки Пильемы обусловлено редким заливанием заросшего участка берегов – 2 раза в месяц. Но видимо накоплению донных осадков здесь препятствуют и сомкнутые высокотравные заросли тростника с проективным покрытием 80%, которые могут задерживать взвешенные в воде частицы, оседающие на стволах растений. Сообщество обуславливает естественную «фильтрацию» воды от взвешенных наносов. Значительное накопление наносов на средней литорали у мыса Пильемский связано не только с морфологией берегов. Большой вклад в накопление вносит перемещение влекомых наносов вдоль берегов. Затихшие от волноприбойного воздействия участки илисто-каменистой литорали занятые сообществами фукусов служат ловушкой для взвеси, оседающей у берегов. Инициации наносов способствуют разреженные сообщества фукусов и крупные валуны, которые они занимают, поскольку уменьшая скорость придонного течения, способствуют осаждению взвешенных частиц. Измерения наносов у мыса Пильемский проведенные в октябре через 2 месяца после первых измерений в августе не показали существенных отличий. Илонакопитель (обозначенный планшет № 4) был повторно установлен в разреженном сообществе тростника на средней литорали (проективное покрытие 30–40%). Высота отложений в илонакопителе также составила 5–10 мм при их общем весе 1667 г/м<sup>2</sup>. Это указывает, что не очень сомкнутые сообщества тростника 2 раза в сутки заливаемые приливом также могут инициировать накопление наносов. Принос наносов в осушную зону моря вносит значительный вклад в формирование берегов и их растительности. Ближе к берегу сообщества фукусов сменяются низкими приливными берегами – маршами, которые образуются за счет приноса наносов в осушную зону и покрыты приморской галофитной растительностью.

Новые результаты о накоплении наносов в береговой зоне Онежского залива открывают перспективы дальнейших исследований гидробиоценозов приливо-отливной зоны Белого моря.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0020.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долотов Ю.С. Процессы рельефообразования и осадконакопления на

- приливных побережьях Мирового океана. М.: Научный мир, 2010. 180 с.
2. Сафьянов Г.А. Береговая зона океана в XX веке. М.: Мысль, 1978. 264 с.
  3. Сергиенко Л.А. Флора и растительность побережий Российской Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: ПЕТР ГУ, 2008. 225 с.
  4. Chapman V.I. Coastal vegetation. N. Y. MacMillan. M.I, 1964. 245 p.
  5. Мосеев Д.С. Некоторые особенности развития маршевых берегов Белого и Баренцева морей // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. Москва: ИО РАН, 2017. С. 245–249.
  6. Мосеев Д.С., Футоран П.А., Яковлев А.Е. О маршах побережья Белого моря на Онежском полуострове // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии Т. II. Москва: ИО РАН, 2022. С. 258–262.

Sediment accumulation was studied in Onega Bay of the White Sea during the summer and fall using sludge traps installed in the intertidal zone. Active sediment accumulation was observed in fucus communities in the middle intertidal zone. Very little sediment accumulation was observed in the reed community in the upper intertidal zone.

**Репкина Т.Ю.<sup>1</sup>, Леонтьев П.А.<sup>2</sup>, Кублицкий Ю.А.<sup>2</sup>,  
Крехов А.К.<sup>3</sup>, Орлов А.В.<sup>2</sup>, Левкова Д.Н.<sup>2</sup>, Вяткин Е.Д.<sup>4</sup>,  
Яковлева А.П.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Институт географии РАН, г.Москва, e-mail: t-repkina@yandex.ru; <sup>2</sup>РГПУ им А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург; <sup>3</sup>СПбГУ, физический факультет, г. Санкт-Петербург; <sup>4</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, г. Москва)

**Морфодинамика берегов Белого моря в позднеледниковье и голоцене: Соловецкий архипелаг и о. Жижгин**

**Repkina T.Yu.<sup>1</sup>, Leontiev P.A.<sup>2</sup>, Kublitskiy Yu.A.<sup>2</sup>,  
Krekhov A.K.<sup>3</sup>, Orlov A.V.<sup>2</sup>, Levkova D.N.<sup>2</sup>, Vyatkin E.D.<sup>2</sup>,  
Yakovleva A.P.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow; <sup>2</sup>Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg; <sup>3</sup>Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg; <sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow)

**Morphodynamics of the White Sea coasts during the Late Glacial and Holocene: Solovetsky Archipelago and Zhizhgin Island**

Ключевые слова: относительный уровень моря, морские берега, «моренные» берега, Белое море, Онежский залив, позднеледниковье и голоцен

Представлены новые данные об изменении относительного уровня моря и береговых процессов на островах Соловецкого архипелага и о. Жижгин за последние ~11.2 тыс. кал.л.н. Прослежена реакция берегов, формирующихся на краевых образованиях последнего оледенения, на изменение ОУМ, волновой нагрузки и продолжительности ледового периода.

Соловецкий архипелаг, северо-западная часть Онежского полуострова и разделяющие их проливы – ключевой район для изучения закономерностей эволюции так называемых «моренных» берегов («moraine coasts» [15]), формирующихся в результате преобразования аккумулятивного ледникового рельефа прибрежно-морскими процессами.

Район исследования представляет собой крупный морфоструктурный и ледниковый «узел» на границе Балтийского кристаллического щита и Русской плиты [1, 2]. Сложный комплекс ледниковых построек различной ориентировки формировался здесь во время нескольких стадий развития и деградации последнего оледенения, вплоть до завершения его невисской (сямозерской) фазы (~14.6–12.9 тыс. кал. л.н.) [10, 11, 13, 14]. Дегляциация протекала на фоне позднеледниковой гляциоэвстатической трансгрессии (~13.4–11.6 тыс. кал.л.н.) [4]. В это время в проливах уже существовал холодноводный солоноватоводный водоем [9–11], тогда как во внутренних частях крупных островов до ~11.2–10.4 тыс. кал.л.н. сохранялись массивы

мертвого льда и приледниковые озера [5, 16]. За последние ~11.0–10.4 тыс. кал.л., в ходе непрерывного понижения относительного уровня моря (ОУМ) со скоростью 2–3 мм/год [5, 12, 16, 17], ледниковые постройки, сложенные песчаным диамиктоном с высоким содержанием валунов [1, 2, 7, 11], попадали в зону действия прибрежно-морских процессов. Образовалась последовательность поднятых береговых линий (БЛ), разнообразных по конфигурации и морфологии [3, 8], что позволяет проследить реакцию берегов разной экспозиции на изменения ОУМ и климата.

Палеолимнологическими методами верхняя морская граница выявлена на о. Анзерский на высотах 21–22 м н.у.м. [5], а на о. Бол. Соловецком – выше 17 м и ниже ~34 м [12, 16]. По данным геолого-геоморфологических исследований террас о. Бол. Соловецком, подкрепленных единичными <sup>14</sup>C датами, верхнюю береговую линию выделяли на высотах 23.5–24 м [8, 9] или 20 м [3]. Время формирования террас о. Жижгин было оценено ранее только на основании их высоты и морфологии [6].

Наши исследования были направлены на уточнение изменений ОУМ, строения, возраста и морфодинамики древних берегов.

В 2022–2023 гг. на островах Бол. Соловецкий, Бол. Муксалма и Бол. Заяцкий (Соловецкий архипелаг) и о. Жижгин были проведены геоморфологические и палеолимнологические исследования, георадиолокационное профилирование (георадар ОКО-3, антенны с частотой 50 и 250 МГц), ГНСС-съемка (DGPS PrinCe i50; комплект база и ровер) и аэрофотосъемка (БПЛА DJI Mini-2). Бурение озерно-болотных отложений осуществлялось с помощью русского торфяного бура (диаметр 5 см, длина керна 1 м). На о. Бол. Соловецком палеолимнологическими методами были изучены донные отложения озер Моренного (урез 25.7 м, порог стока 26.5 м н.у.м.) и Рыбка (урез и порог стока 24 м), расположенных вблизи предполагаемой [8] верхней морской границы, и оз. Варваринского (урез 8.4 м). Получены литологические колонки из отложений чехла террас высотой 1.2–3, 10–16 и 20–22 м н.у.м. На о. Жижгин пробурены донные отложения трех озер: Водоносного (урез 14.1 м, порог стока – 15 м н.у.м.), Черняевского (3.9 м) и «Дашиного» (3.1 м), а также отложения низкой террасы (1.8 м) и лайды (0.2 м). Радиоуглеродное датирование 20 образцов проведено в лабораториях СПбГУ и Laboratorium Datowań Bezwzględnych (г. Краков, Польша). Строения и высоты древних БЛ уточнены при дешифрировании космических снимков, ЦМР и топографических карт.

На о. Бол. Соловецком и о. Бол. Муксалма новые данные позволили уточнить ход изменения ОУМ, и, таким образом, время образования террас и БЛ. Верхняя БЛ зафиксирована в рельефе и на георадарных профилях на высотах 23–25 м н.у.м. Время ее формирования (~11.2–10.7 тыс. кал.л.н.) установлено по датам из контакта сизо-серых алевритов и гиттии в донных отложениях оз. «Рыбка». Морфология БЛ изменяется в зависимости от открытости древних берегов воздействию волн и их экспозиции. *На*

*открытых приглубых берегах* развиты абразионные уступы и бенчи, выработанные в морене, или галечно-валунные береговые валы. На северо-востоке и юге о. Бол. Соловецкого прослежена смена типа берега с высотой – абразионные ступени с практически не окатанными обломками (~23–25 м) ниже резко сменяются береговыми валами из хорошо окатанной крупной гальки и валунов. На СЗ о. Бол. Соловецкого преобладают аккумулятивные галечно-валунные, а на востоке о. Бол. Муксалма – абразионные БЛ. *На берегах, которые были защищены от воздействия волн* широкими отмелями (сейчас это плоские или слабо волнистые террасы с останцами ледниковых холмов и гряд), БЛ выделяются по подножиям абразионных уступов или валунным отмыткам (~23–24 м). На радарограммах прослежен небольшой по мощности слой горизонтально-слоистых, вероятно относительно грубых осадков, с размывом залегающих в понижениях морены. *Во внутренней части о. Бол. Соловецкого*, в проливах между моренными постройками, которые были заблокированы от воздействия волн, присутствуют фрагменты эрозионных БЛ (~23–24.5 м). На днищах проливов морена перекрыта песками и алевритами.

Похожие закономерности распределения БЛ разных типов сохраняются, в целом, и на более низких уровнях, вплоть до современной береговой зоны. Важно, что как на древних, так и на современных берегах, валунные мысы и гряды (относительная высота до 1 м), сформировавшиеся благодаря селективной эрозии ледниковых отложений, повсеместно служат границами морфолитодинамических ячеек и ядрами аккумуляции более тонких наносов. В целом, даже на открытых берегах, высота террас зависит от строения рельефа ледникового комплекса, частично сглаженного прибрежно-морскими процессами.

Изменения высоты БЛ, связанные с неравномерной волновой нагрузкой, положением моренного цоколя и валунных скоплений, может быть одной из причин разногласия в определении высоты террас [1, 8]. По нашим данным наиболее отчетливо выделяются террасы на высотах от 16 до 18–19 м и ≤1.2–3 м н.у.м. Первая из них на открытых берегах часто ограничена протяженными абразионными уступами, а во внутренней части о. Бол. Соловецкого имеет большую мощность песчаного чехла. Ее возраст по датам из отложений Бол. Корзино [16] и осадков чехла террасы [8] – ~8-6 тыс. кал.л.н. Нижняя терраса плоская, иногда с песчаными и песчано-галечными береговыми валами, окаймляет острова прерывистой полосой. Она сформировалась ~2–0.8 тыс. кал.л., а в сильные штормы захлестывается волнами. Большая трансформация ледникового рельефа на этих высотах указывает на замедление понижения ОУМ, что совпадает с данными [16], а также, вероятно, на активизацию береговых процессов.

На о. Жижгин тенденции изменения ОУМ близки описанным выше. Однако на небольшом (~3 км<sup>2</sup>) островке, открытом волнам, ледниковый рельеф существенно изменен. Останец моренной гряды (17–28.7 м н.у.м.)

был абрадирован, вероятно, во время позднеледниковой трансгрессии [6]. Абразионно-аккумулятивная терраса с валунно-галечными береговыми валами (15–17 м) ограничена отчетливыми БЛ. Даты из донных отложений оз. Водоносного указывают на стабилизацию ОУМ в интервале ~8.5–7.2 тыс. кал.л.н. Абразионно-аккумулятивные террасы с галечными или песчаными береговыми валами и дюнами (2–10 м) формировались в интервале времени ~ранее 4–0.7 тыс.кал.л.н., а современная терраса (ниже 2 м н.у.м.) – начиная с ~0.7 тыс. кал.л.н. Наличие сложно организованных БЛ и запасов песков, достаточных для образования дюн, свидетельствует о замедлении понижения ОУМ и более длительной переработке морем ледниковых отложений. Судя по распределению запасов песков, начиная со среднего голоцена, волновое воздействие было более интенсивным на южных берегах острова, открытых осенним и зимним штормам.

Таким образом, на изученных островах береговые процессы были активны начиная с ~11.2–10.7 тыс. кал.л.н. Они активизировались ~8.5–6 тыс. кал.л.н., в условиях стабилизации ОУМ во время трансгрессии Тапес и уменьшения продолжительности ледового периода [9], сопровождавшегося, вероятно, увеличением интенсивности волнения.

Полевые работы выполнены при поддержке проекта РНФ 22-17-00081, палеолимнологические исследования частично соответствуют теме ГЗ РГПУ им. А.И. Герцена № 2023-2025 VRFY-2023-0010. Геоморфологический анализ проведен в рамках темы ГЗ ИГ РАН № FMWS-2024-0005.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000. Лист Q-35(36). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 302 с.
2. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000. Лист Q-37.. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 302 с.
3. Большианов Д.Ю. О тектоническом происхождении грядового рельефа Северо-Запада на примере Соловецких островов и Карельского перешейка // Фундаментальные проблемы квартера. М.: ГЕОС, 2017. С. 55–56.
4. Корсакова О.П. Побережье Белого моря в пределах Фенноскандинавского кристаллического щита в неоплейстоцене и голоцене // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 6. С. 883–897.
5. Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В., Субетто Д.А. и др. Хроно- и литостратиграфия озерных отложений острова Анзер (Соловецкие острова) в контексте послеледниковой истории Белого моря // Известия РАН. Серия географическая. 2022. № 86. № 6. Р. 914–932.
6. Лаврова М.А. К геологии Онежского полуострова Белого моря // Тр.

Геол. музея Ак. наук. 1931. Т. VIII. 70 с.

7. Мелитицкий А.В., Сухопаров Л.Д., Тарасов В.А. и др. Отчет о проведении поисков песчано-гравийного материала и песка на Соловецких островах в Приморском районе Архангельской области. Архангельск: “Архангельскгеология”, 1987. 339 с.

8. Никишин Н.А. Особенности развития Соловецких островов в голоцене // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 1984. № 5. С. 55–57.

9. Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Лисицын А.П. и др. Современные данные по биостратиграфии и геохронологии донных осадков Белого моря // ДАН. 2014. Т. 454. № 4. С. 467–473.

10. Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Спиридонова Е.А. и др. Четвертичные отложения Онежского залива и основные черты его палеогеографии в плейстоцене-голоцене // Комплексные морские геолого-геофизические исследования внутренних морей гляциального шельфа. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. С. 38–52.

11. Рыбалко А.Е., Репкина Т.Ю., Корсакова О.П. и др. Соловецкий архипелаг в позднем неоплейстоцене – голоцене: корреляция данных морских и наземных исследований // ДАН. 2025 (в печати).

12. Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В. и др. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Т. 446. № 2. С. 183–190.

13. Demidov I., Houmark-Nielsen M., Kjær K. et al. The Last Scandinavian Ice Sheet in northwestern Russia: Ice flow patterns and decay dynamics // *Boreas*. 2006. № 4. pp. 425–443.

14. Ekman I., Iljin V. Deglaciation, the Young Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // *Glacial deposits in North-east Europe*. Rotterdam: Balkama, 1995. P. 195–209.

15. Kelletat D. H. Atlas of Coastal Geomorphology and Zonality // *Journal of Coastal Research*. 1995. SI № 13. P. 101–286.

16. Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D. et al. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions // *Quaternary International*. 2021. № 644–645(1) P. 61–78.

17. Subetto D.A., Firsenkova V.M., Leontiev P.A., et al., Solovetsky Islands (the White Sea): interweaving of geomorphology and recent history // *Doklady Earth Sciences*. 2024. V. 519. Supp. 1. P. S67–S74.

We present new data on the relative sea level (RSL) changes and coastal processes on the Solovetsky Archipelago and Zhizhgin Island over the past 11.2 ka BP. The response of «moraine coasts» to RSL changes, wave forcing and duration of the ice period is analyzed.

**Савенко А.В.**

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва,  
e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru)

**Современная тенденция изменения характера  
распределения растворенного минерального фосфора в  
устьях малых рек Кандалакшского залива Белого моря  
Savenko A.V.**

(Moscow M.V. Lomonosov State University, Moscow)

**The modern trend of changes in the character of distribution  
of dissolved mineral phosphorus in the mouths of small rivers  
of the Kandalaksha Bay of the White Sea**

Ключевые слова: устья рек, Кандалакшский залив, биогенные элементы, поведение, эвтрофикация

По данным наблюдений автора и литературных источников с 1990 по 2025 гг. установлено, что после 2010 г. в устьевых областях рек водосбора Кандалакшского залива Белого моря произошло принципиальное изменение характера распределения растворенного минерального фосфора в результате значительного увеличения его содержания в морской водной массе при сохранении концентрации в ней кремния на примерно постоянном уровне в течение всего рассмотренного периода.

Начавшееся более века назад глобальное потепление наиболее сильно отражается на состоянии арктических экосистем в связи с сокращением продолжительности периодов устойчивого залегания снежного покрова и ледостава, играющих ключевую роль в их функционировании. Это приводит к интенсификации процессов, влияющих на формирование химического состава вод: выветривания пород на водосборах, эрозии береговых линий и продуцирования биомассы. Особо значимы эти процессы для принимающих материковый сток растворенных и твердых веществ прибрежных морских акваторий, химический состав которых нередко претерпевает необратимые изменения, например, смену трофического статуса в результате накопления биогенных элементов.

В настоящем сообщении по данным наблюдений автора в течение последних 16 лет и работ [1–5] рассмотрена динамика характерных черт распределения растворенных форм минерального фосфора и кремния в устьях малых рек и ручьев Кандалакшского залива Белого моря за 35-летний период (1990–2025 гг.).

Были изучены устья 13 водотоков (таблица), охватывающих все побережье Кандалакшского залива. В зонах смешения испытывающей наибольшую антропогенную нагрузку р. Нивы и близкой к естественному состоянию расположенной недалеко от нее р. Колвицы в июне 2000 и 2016 гг. проводились параллельные гидрохимические съемки. Также в феврале

2010 и 2020 гг. были выполнены одни из первых в этом районе зимних исследований в устьях рек Стрельны и Кузреки.

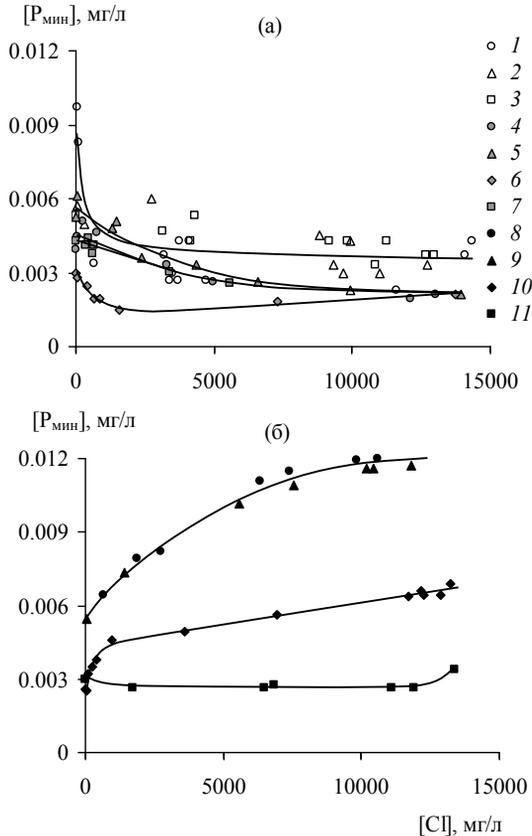
Таблица. Периоды наблюдений за распределением биогенных элементов в устьях малых рек и ручьев Кандалакшского залива Белого моря

Водный объект	Среднегодовой сток воды*, км <sup>3</sup>	Период наблюдений	Источник данных
Р. Ковда	9.04	07.2025	Данные А.В. Савенко, отбор проб Н.М. Михайловой
Р. Княжая	–	06.2000	[4]
Р. Нива	5.06	07.1993 06.2000 06.2016	[3] [4] Данные А.В. Савенко, отбор проб Т.А. Черепановой
Р. Колвица	0.48	06.2000 06.2016	[4] Данные А.В. Савенко, отбор проб Т.А. Черепановой
Ручей в губе Вост. Порьей	–	07.2008	[5]
Р. Черная и 3 ручья**	–	07–08.1990– 1992	[1, 2]
Р. Кузрека	0.09	02.2020	Данные А.В. Савенко, отбор проб Н.А. Демиденко
Р. Индера	0.09	09.2008	[5]
Р. Чаваньга	0.46	09.2008	«
Р. Стрельна	0.98	02.2010	Данные А.В. Савенко, отбор проб М.Н. Кожина

Примечание: \* по данным [6] с дополнениями; \*\* ручьи Ругозерский, Еремеевский и Кислый.

Сравнительный анализ полученных результатов показал (рис. 1), что до начала 2010-х гг. в водах Кандалакшского залива поддерживался низкий уровень концентраций растворенного минерального фосфора (2–4 мкг/л), тогда как на геохимическом барьере река–море либо происходила его ассимиляция гидробионтами (устья Нивы, Индеры, Чаваньги, Стрельны и ручья в Восточной Порьей губе), либо при сбалансированности продукционно-деструкционных процессов наблюдалось квазиконсервативное поведение (устья Колвицы, Княжой и Черной с окрестными ручьями). Однако к лету 2016 г. содержание растворенных фосфатов в вершине Кандалакшского залива возросло в 4 раза – до 12 мкг Р/л, что вызвало кардинальное изменение характера их распределения в устьях Нивы и Колвицы. При практически точном соответствии концентраций  $P_{мин}$  в водах этих рек в 2000 и 2016 гг. (7–8 мкг/л для Нивы и 5–6 мкг/л для Колвицы) отмечалась не только смена угла наклона

зависимости  $P_{\text{мин}}-Cl$  с отрицательного на положительный, но и дополнительный привнос значительных количеств фосфатов на протяжении всей зоны смешения. Даже в устье Ковды – самой многоводной среди изученных рек – содержание растворенного минерального фосфора в июле 2025 г., несмотря на его примерно постоянное значение 3 мкг/л во всем диапазоне хлорности, на морской границе зоны смешения заметно увеличивалось.

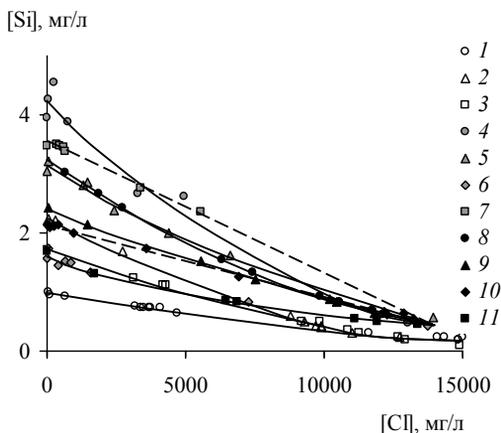


**Рис. 1.** Зависимости концентрации растворенного минерального фосфора (а) до и (б) после 2011 г. от содержания хлоридов в устьях малых рек и ручьев Кандалакшского залива Белого моря:

1–3 – реки Нива, Колвица и Княжая, июнь 2000 г.; 4 – ручей в Восточной Порьей губе, июль 2008 г.; 5, 6 – реки Индера и Чаваньга, сентябрь 2008 г.; 7 – р. Стрельна, февраль 2010 г.; 8, 9 – реки Нива и Колвица, июнь 2016 г.; 10 – р. Кузрезка, февраль 2020 г.; 11 – р. Ковда, июль 2025 г.

Сходная трансформация закономерностей миграции растворенного минерального фосфора характерна и для зимнего ледостава. В отличие от биологического потребления фосфатов в устье Стрельны в феврале 2010 г. при снижении их концентрации до обычного в “базовый” период уровня, в устье Кузреки в феврале 2020 г. на начальной стадии осолонения в раствор дополнительно поступало до 80% речного стока  $P_{\text{мин}}$ , после чего его содержание линейно увеличивалось до 7 мкг/л. Остается неясным, затронула ли эвтрофикация воды основной части Кандалакшского залива или ограничивается его прибрежной акваторией, где концентрация фосфора может возрастать в результате усиления береговой эрозии.

Для кремния, не имеющего мощных антропогенных источников, подобной трансформации содержания в прибрежных водах Кандалакшского залива и распределения в зоне смешения речных и морских вод не произошло. Пространственно-временная изменчивость его концентраций заключалась только в вариациях поступления с речным стоком при неизменном для всего 35-летнего периода содержании на морской границе устьевых областей, а степень неконсервативности поведения на геохимическом барьере река–море определялась интенсивностью поглощения специфическими потребителями этого элемента диатомовыми водорослями (рис. 2). Поэтому во время зимних съезок устьев Стрельны и Кузреки, а также для некоторых водотоков (Черной и окрестных ручьев) летом распределение растворенного кремния было консервативным.



**Рис. 2.** Зависимости концентрации растворенного кремния от содержания хлоридов в устьях малых рек и ручьев Кандалакшского залива Белого моря: 1–3 – реки Нива, Колвица и Княжая, июнь 2000 г.; 4 – ручей в Восточной Порьей губе, июль 2008 г.; 5, 6 – реки Индера и Чаваньга, сентябрь 2008 г.; 7 – р. Стрельна, февраль 2010 г.; 8, 9 – реки Нива и Колвица, июнь 2016 г.; 10 – р. Кузрека, февраль 2020 г.; 11 – р. Ковда, июль 2025 г. Пунктиром показаны линии, соответствующие консервативному поведению.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00275, <https://rscf.ru/project/24-27-00275/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарова Е.А., Савенко В.С. Биогенные элементы в эстуариях малых рек Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1993. № 6. С. 64–67.
2. Пантюлин А.Н., Повалишникова Е.С., Захарова Е.А., Хоуланд Р. Гидрологические и гидрохимические особенности малых эстуариев Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1994. № 5. С. 86–96.
3. Захарова Е.А. Основные закономерности глобального стока фосфора // Дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Геогр. ф-т МГУ, 06.04.1995. 203 с.
4. Савенко А.В. Гидрохимическая структура устьевых областей малых рек, впадающих в Кандалакшский залив Белого моря // Океанология. 2001. Т. 41. № 6. С. 835–843.
5. Савенко А.В., Покровский О.С., Кожин М.Н. Трансформация стока растворенных веществ в устьевых областях малых водотоков южного побережья Кольского полуострова // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 837–848.
6. Иванов В.В., Брызгалов В.А. Гидролого-гидрохимический режим водосбора Белого моря // Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова и А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 119–145.

Based on the author's observations and literary sources from 1990 to 2025, it was established that after 2010, in the mouth areas of the rivers in the catchment area of the Kandalaksha Bay of the White Sea, a fundamental change occurred in the nature of the distribution of dissolved mineral phosphorus as a result of a significant increase in its content in the seawater mass while maintaining the concentration of silicon in it at an approximately constant level throughout the entire period under consideration.

**Стародымова Д.П., Котова Е.И., Коченкова А.И.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

[starodymova.dp@ocean.ru](mailto:starodymova.dp@ocean.ru))

## **Атмосферное поступление вещества на водосбор Северной Двины как источник тяжелых металлов в речном стоке**

**Starodymova D.P., Kotova E.I., Kochenkova A.I.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

## **Atmospheric input of matter to the Severnaya Dvina basin as a source of heavy metals in river runoff**

Ключевые слова: снежный покров, взвешенное вещество, Северная Двина, половодье

Атмосферные поступления аэрозолей, накопленные в течение зимы снежным покровом, в период снеготаяния вносят значительный вклад в речной твердый сток. В течение двух лет производились наблюдения за составом взвешенного вещества атмосферных осадков, выпадающих на территории Архангельской области в холодное время года. Сопоставление состава взвеси снега и взвеси Северной Двины, отобранной в период зимней межени и весеннего паводка, показало, что концентрации ряда металлов во взвешенном веществе снега превышают таковые в речной взвеси. Полученные данные позволяют оценить приблизительно долю атмосферного поступления в годовом речном стоке этих металлов.

Атмосферные осадки вымывают аэрозоли из атмосферы. В зимнее время весь этот материал накапливается в снежном покрове и во время снеготаяния массово поступает в речную сеть. Поскольку доля речного стока в период весеннего паводка составляет значительную часть годового стока, влияние геохимии снежного покрова на годовой баланс поступления вещества с речными водами очень велико, хотя и недостаточно изучено [1, 2]. Начиная с 2015 г., сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводятся круглогодичные исследования взвешенного вещества реки Северной Двины [3, 4]. В период с 2019 по 2021 гг. проводилось исследование взвешенного вещества в снеге атмосферных осадков, результаты которого были опубликованы ранее [5]. Целью данной работы было сопоставление концентраций тяжелых металлов во взвешенной фракции снега и речной воды, которые были отобраны в одни и те же годы, для оценки доли тяжелых металлов, поступающей в речную систему с тальми водами.

Регулярный отбор проб речной воды (не реже, чем раз в месяц) производится на станциях в границах города Архангельск и в устье реки Лявля (30 км от Архангельска выше по течению реки) (рис. 1). Речная сеть собирает вещества (в том числе поллютанты) со всей территории водосбора, а состав речного стока в нижнем течении отображает интегральное поступление от всех источников и может служить характеристикой

вещества, которое поступает в море.

Отбор проб снега производился в границах города Северодвинск и на удаленной станции в деревне Заборье (рис. 1) [5]. Пробы снега, отобранные в черте города, служат для характеристики антропогенного воздействия на атмосферу разнообразными источниками в населенном пункте, влияние которых довольно ограничено по площади. В то же время пробы снега, отобранные в фоновом районе, являются более показательными для целого водосбора.

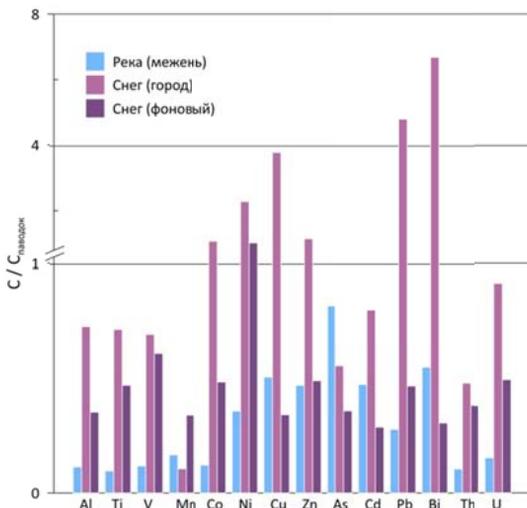


**Рис. 1.** Схема расположения станций отбора проб атмосферных осадков (снега) и речной воды.

После отбора пробы речной воды и талого снега были профильтрованы через ядерные фильтры с диаметром пор 0.45  $\mu\text{m}$  для определения массовой концентрации (мг/л) взвеси и дальнейшего изучения ее состава. Микроэлементный состав взвеси был изучен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 7500 после предварительного разложения смесью концентрированных кислот.

По результатам анализов были рассчитаны средние концентрации металлов во взвешенной фракции в снеге (в городе и в фоновом районе), а также в речной воде (в период зимней межени и половодья). Концентрации элементов были нормализованы на состав взвешенной фракции в речной воде в период половодья. Концентрации Al, Ti, V, Mn, Co, Th и U в реке в период межени приблизительно в 10 раз меньше, чем в период весеннего половодья (рис. 2), в то время как концентрации Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Bi в речной воде в период межени составляют от 30 до 80% от концентраций в период половодья.

Самые высокие концентрации элементов выявлены для Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Bi в городском снеге. Эти элементы поступают от разных антропогенных источников: транспорт, дорожная пыль, предприятия ТЭК и прочие промышленные предприятия [6, 7]. Концентрации взвешенной фракции элементов в снеге фонового района составляют от 28% (для Cd) до 60% (для V). Концентрация никеля в снеге фонового района превышает его концентрацию в реке в период паводка. Эти данные показывают, что значительная доля тяжелых металлов в речном стоке в период паводка привнесена с тальми водами, а значит, поступает за счет атмосферного переноса.



**Рис. 2.** Концентрация взвешенного вещества в устьевой области р. Северная в период весеннего паводка в 2021–2025 гг.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СЗО ИО РАН, а также Котову А.А., Молокову В.А. и сотрудникам Северодвинской гидрометеорологической станции за их помощь в сборе и подготовке проб. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chupakov A.V., Pokrovsky O.S., Moreva O.Y. et al. High resolution multi-annual riverine fluxes of organic carbon, nutrient and trace element from the largest European Arctic river, Severnaya Dvina // *Chemical Geology*. 2020. V. 538. 119491.
2. Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S. et al. Dissolved, suspended, and

colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina River and its tributary // *Chemical Geology*. 2010. V. 273. № 1–2. P. 136–149.

3. Гордеев В.В., Коченкова А.И., Лохов А.С. и др. Сезонные и межгодовые вариации концентраций и стоков растворенных и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белое море // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 1. С. 41–55.

4. Гордеев В.В., Шевченко В.П., Новигатский А.Н. и др. Переходная зона река–море (маргинальный фильтр) Северной Двины как эффективная ловушка речного осадочного материала на пути в открытую область Белого моря // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 2. С. 260–270.

5. Starodymova D.P., Kotova E.I., Shevchenko V.P. et al. Winter atmospheric deposition of trace elements in the Arkhangelsk region (NW Russia): Insights into environmental effects // *Atmospheric Pollution Research*. 2024. V. 15. 102310.

6. Таловская А.В., Симоненков Д.В., Филимоненко Е.А. и др. Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012/13 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 11. С. 999–1005.

7. Шевченко В.П., Алиев Р.А., Бобров В.А. и др. Эоловый материал в природных архивах // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 70–107.

Atmospheric aerosols accumulated during the winter by the snow cover and are released during the snowmelt contribute significantly to river runoff. Observations were carried out for two years on the composition of particulate matter in atmospheric precipitation in the Arkhangelsk region during the cold season. Comparing the composition of snow particulates and Northern Dvina particulate matter samples collected during the winter low-water and the spring flood showed that the particulate concentrations of certain metals in snow were higher than those in river. The data obtained allow us to estimate approximately the proportion of atmospheric input in the annual river discharge of these metals.

**Чернов И.А., Толстиков А.В.**

(Карельский научный центр РАН, г. Петрозаводск, e-mail: [chernov@krc.karelia.ru](mailto:chernov@krc.karelia.ru);

**Численная модель сверхмалого водоема: бухты**

**Благополучия в Белом море**

**Chernov I.A., Tolstikov A.V.**

(Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk)

**Numerical model of a very small water body: the Blagopoluchia bay in the White Sea**

Ключевые слова: численное моделирование, Белое море, термохалинная структура, динамика течений

Представлена численная модель динамики течений и термохалинной структуры бухты Благополучия на острове в Белом море. Модель основана на модели Белого моря и адаптирована для очень малых шагов по пространству и времени: 25 см по вертикали, 10 м по горизонтали, 5 секунд по времени. Учитывается водообмен с морем, сток рек, динамика верхней границы моря. Ледяной покров однороден по водоему. Первые результаты показывают, что модель работоспособна и дает разумные результаты.

Численное моделирование динамики водоемов хорошо дополняет полевые исследования. Комплексное моделирование состояния водоема как системы вод, льда и, возможно, экосистемы нуждается в высокопроизводительных вычислительных устройствах, современных алгоритмах и адекватном математическом описании.

Условие устойчивости Куранта связывает пространственное разрешение модели, шаг по времени и типичные скорости в водоеме. Для малых водных объектов это парадоксальным образом делает задачу более сложной и ухудшает устойчивость выбранных расчетных схем.

Программный комплекс JASMINE [1] был создан на базе модели Северного Ледовитого океана (FEMAO) Н.Г. Яковлева [2] и в соавторстве с ним и адаптирован для условий Белого моря: водоема с небольшими размерами, мелководного и со сравнительно высокими скоростями течения. Шаг горизонтальной сетки составил 3 км (по долготе шаг зависит от широты и варьируется от 2.9 до 3.1 км), вертикальная сетка имеет шаг 5 м, для (относительно) глубоководных областей – 10 м, начиная с глубины 150 м. Шаг по времени – 5 мин. Есть возможность рассчитывать поверхностные и трехмерные поля, описывающие состояние моря, а также динамику экосистемы и перенос пассивных (то есть, не влияющих на состояние моря) примесей любой природы.

Бухта Благополучия представляет собой водоем существенно более малый, по сравнению с относительно малым Белым морем. Перенос модели на нее является серьезным вызовом, так как многие предположения,

положенные в основу модели, выполняются с натяжкой, как, например, малая глубина водоема (до 10 м) по сравнению с горизонтальным размерами (водоем вписан в прямоугольник 500 на 400 м, при этом имеются узости шириной в десятки метров).

На базе натуральных измерений в Бухте создана батиметрическая карта, сформирована вычислительная область, помечена жидкая граница и сток пяти небольших рек. Область вписана в прямоугольник, заданный диапазоном координат  $35^{\circ}41'49''$  –  $35^{\circ}42'28''$  в.д. и  $65^{\circ}1'24''$  –  $65^{\circ}1'36''$  с.ш. Острова в модельной области отсутствуют. Реки заданы координатами устьев, измеренные расходы экстраполированы на все время расчета.

Вертикальный шаг сетки 25 см, горизонтальные шаги около 10 м (по меридиану ровно 9 м 76 см, по параллелям 10 м 40 см). Максимальная глубина Бухты в модели составила 9.5 м, минимальная ограничена 0.75 м. Шаг по времени составил 5 секунд, что делает задачу крайне вычислительно емкой, при этом малые размеры области (50 на 40 узлов) затрудняют распределение расчета на большое число вычислительных ядер.

Атмосферный форсинг задан из данных реанализа NCEP/NOAA [3], по существу берется единственная точка. Задаются характеристики приводного слоя воздуха (температура, влажность), атмосферное давление, осадки, балл облачности, вектор скорости ветра. Солнечная радиация рассчитывается с учетом склонения Солнца и облачности, потоки тепла – по балк-формулам.

На жидкой границе, проходящей по западной стороне прямоугольника и частично по северной, задаются соленость и температура воды, а также уровень моря. При втекании воды в область вода имеет заданные температуру и соленость, а при вытекании выносятся тепло и соль согласно расчетным значениям. Внешний уровень моря трактуется не так, как в модели Белого моря (как отклонение уровня моря от геоида): предполагается, что уровень в очень небольшом водоеме быстро выравнивается, поэтому отслеживается некоторое остаточное колебание уровня, не превосходящее 10 см. Рассчитываемое поле уровня также имеет смысл отклонения от среднего, а не от геоида. По заданному внешнему и рассчитанному внутреннему уровням рассчитывается поток воды через границу. Это наиболее сложная с точки зрения устойчивости часть расчета.

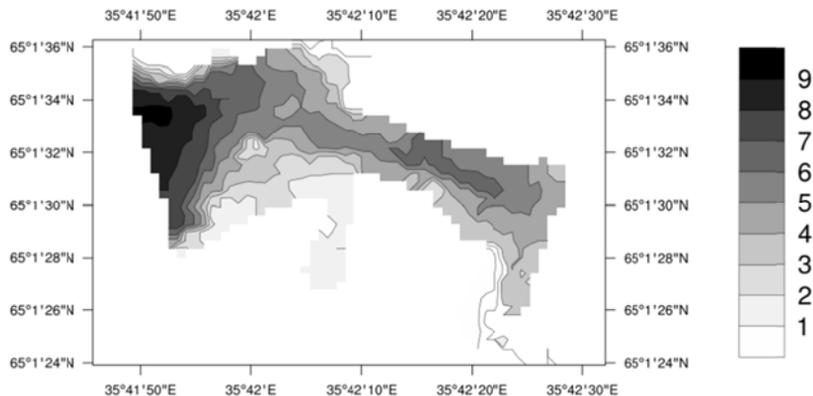
Вычисления проводились на кластере Центра коллективного пользования КарНЦ РАН. На 25 вычислительных ядрах скорость вычислений составила 8 суток за час, что позволяет провести расчет нескольких месяцев или лет за разумное время.

Модель описывает динамику вод и термохалинных полей, а также структуру морского льда. Для условий Бухты выглядит разумным предположение о сплошном ледяном покрове, что упрощает модель.

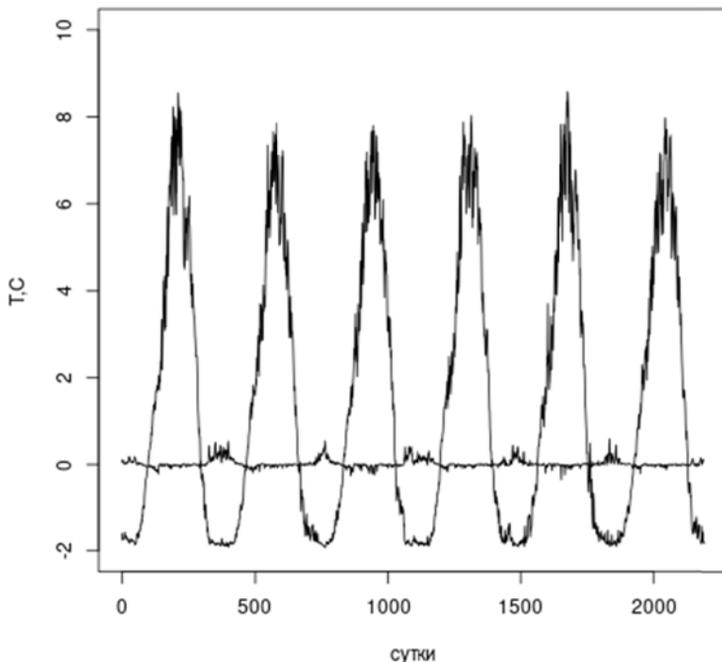
Модифицировано условие на уровень моря на «жидкой» границе области.

Расчет на 5 лет показывает, что термохалинная структура водоема

воспроизводится правильно.



**Рис. 1.** Батиметрическая карта в проекции Меркатора. Глубины в метрах.



**Рис. 2.** Средняя по акватории температура поверхности воды и отклонение солёности от 35 епс.

Авторы признательны проф. Н.Г. Яковлеву за всемерную поддержку в проведении исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A. et al. Study Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling // J. Mar. 2018. doi:10.1016/j.jmarsys.2018.06.006.
2. Яковлев Н.Г. О воспроизведении полей температуры и солености Северного Ледовитого океана // Известия РАН, ФАО. 2012. Т. 48. № 1. 100116.
3. Данные реанализа NOAA. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 09.09.25)

We present a numerical model of currents and thermohaline structure of the Blagopoluchiya bay in the White Sea. The model is based on the JASMINE model of the White Sea and has been modified for extra small spatial and temporal steps: 25 cm vertical grid, 10 m horizontal grid, 5 s in time. Liquid boundary and water exchange with the sea is taken into account, as well as river discharge and free water surface. Ice is assumed to be homogeneous along the bay. First results show that the model produced reasonable results.

**Шевченко В.П.<sup>1</sup>, Стародымова Д.П.<sup>1</sup>, Саввичев А.С.<sup>2,3</sup>,  
Новигатский А.Н.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

[vshevch@ocean.ru](mailto:vshevch@ocean.ru); <sup>2</sup>Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва; <sup>3</sup>ГБОУ Школа № 1553 имени В.И. Вернадского, г. Москва)

**Накопление тяжелых металлов кустистыми эпифитными  
лишайниками Кенозерского национального парка  
(Архангельская область)**

**Shevchenko V.P.<sup>1</sup>, Starodymova D.P.<sup>1</sup>, Savvichev A.S.<sup>2,3</sup>,  
Novigatsky A.N.<sup>1</sup>**

(<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow; <sup>2</sup>Vinogradsky Institute of Microbiology of the Federal Research Centre "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow; <sup>3</sup>State Budgetary Educational Institution School № 1553 V.I. Vernadsky, Moscow)

**Accumulation of heavy metals by fruticose epiphytic lichens of  
the Kenozersky National Park (Arkhangelsk Region)**

Ключевые слова: тяжелые металлы, природные архивы, эпифитные лишайники  
рассеянное осадочное вещество атмосферы, атмосферный перенос, загрязнение

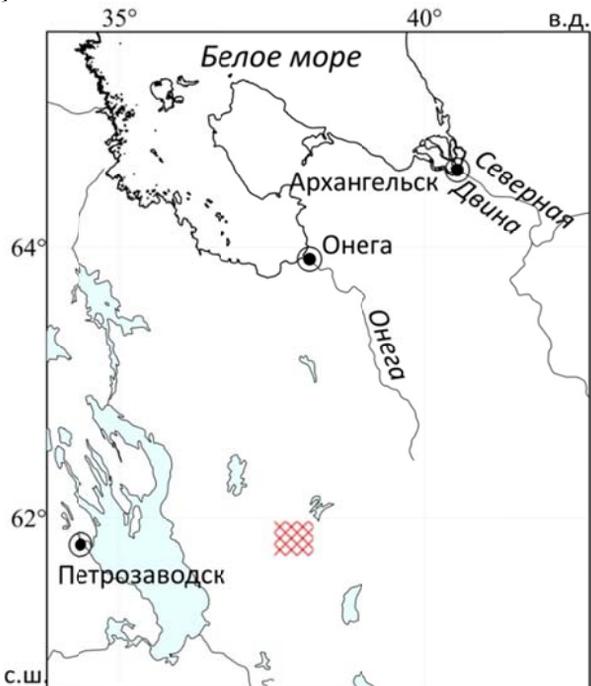
Обобщены результаты изучения накопления тяжелых металлов кустистыми эпифитными лишайниками Кенозерского национального парка (КНП), находящегося на водосборе Онежского залива Белого моря. Показано, что содержание тяжелых металлов в этих лишайниках находится на фоне для севера Европейской части России уровне. Для многих тяжелых металлов, осевших из атмосферы на лесную экосистему КНП, основным источником является литогенный, а для токсичных Cd, Sb, Pb и Bi – антропогенный.

Элементный состав лишайников является важным индикатором при оценке роли атмосферного переноса тяжелых металлов и ряда других загрязняющих веществ [1]. Лишайники, являющиеся симбиозом грибов и зеленых водорослей или цианобактерий [2], получают необходимую влагу, биогенные вещества и микроэлементы преимущественно из атмосферы; они являются их естественными биосорбентами [3]. Поэтому лишайники являются одним из природных архивов, показывающих степень интегрального накопления химических элементов, включая тяжелые металлы (многие из которых токсичны для живых организмов), в результате поступления их из атмосферы [4–7].

В водосборном бассейне Белого моря исследование элементного состава лишайников было начато нами в рамках междисциплинарного проекта "Система Белого моря", которым руководил академик А.П. Лисицын [1, 8]. В данной работе обобщены результаты исследования тяжелых металлов в

кустистых эпифитных лишайников в Кенозерском национальном парке (КНП).

В 2004–2025 гг. 25 проб эпифитных кустистых лишайников (14 проб *Usnea dasopoga* (синоним – *Usnea filipendula*), 2 пробы *Bryoria capillaris*, 1 проба *Alectoria sarmentosa* subsp. *sarmentosa*) и 8 проб *Usnea spp.* были собраны в южной части КНП вблизи деревни Думино во время зимних экспедиций биогеохимической специализации Школы № 1553 имени В.И. Вернадского г. Москвы [9]. Эти виды лишайников широко распространены в районе исследований [10]. Схема расположения района отбора проб показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема расположения района отбора проб лишайников в Кенозерском национальном парке (красный квадрат)

Пробы лишайников отбирали с веток деревьев на высоте около 1.5 м в стерильные полиэтиленовые пакеты, используя одноразовые полиэтиленовые перчатки. Высушенные пробы растирали в агатовой ступке, разлагали смесью концентрированных ультрачистых кислот в тefлоновых контейнерах и анализировали методами масс-спектрометрии и атомной эмиссии с индуктивно-связанной плазмой в Центре коллективного пользования научным оборудованием ИПТМ РАН [11].

Для выявления вклада литогенного или иного источника формирования

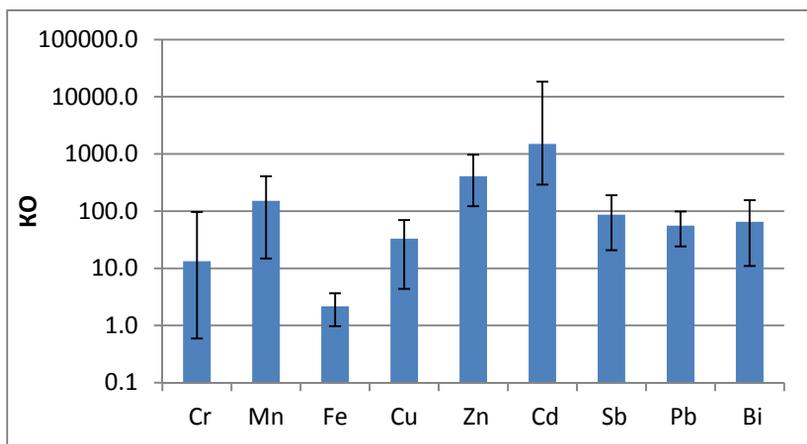
микроэлементного состава лишайников был рассчитан коэффициент обогащения (КО) относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры (з.к.) по формуле:  $КО = \frac{Эл/Al}{(Эл/Al)_{з.к.}}$ , где Эл и Al – содержание химического элемента и алюминия в пробе и в верхней части континентальной земной коры [12]. Значения  $КО > 10$  свидетельствуют о дополнительном источнике элемента, отличном по составу от литогенного. На суше таким источником обычно является антропогенный.

Сравнение с литературными данными о содержании тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках северных районов Европейской части России [1, 6, 8, 13] наших данных показало, что содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Кенозерского национального парка находится на фоновом уровне. Это обусловлено удаленностью КНП от крупных городов, промышленных центров, железнодорожных путей.

На рис. 2 мы видим коэффициенты обогащения (КО) изученных проб относительно среднего состава верхней части континентальной коры. КО Fe значительно ниже 10, его источник в основном литогенный, оно поступает из атмосферы при осаждении минеральных аэрозолей. Средние значения КО лишайников такими элементами как Cr и Cu незначительно превышают 10. Эти элементы в незначительном количестве необходимы для жизнедеятельности биоты, а при сильном обогащении становятся токсичными [3, 14]; дополнительным к литогенному их источником является антропогенный. Высокие значения КО изученных проб лишайников биогенными элементами Mn и Zn определяются влиянием биотических факторов фитоценоза [3, 13, 14], даже при незначительном влиянии антропогенных источников.

Биологически полезная роль Cd, Sb, Pb и Bi, средние значения КО которыми изученных лишайников более 55 (а для Cd оно составляет 1500), неизвестна; все эти тяжелые металлы токсичны, особенно Cd [3, 14]. Основным источников этих 4-х элементов в аэрозолях является антропогенный; при осаждении эолового материала в результате атмосферного переноса [1, 15, 16] они существенно обогащают лишайники и другие организмы.

Таким образом, наши исследования показали, что содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Кенозерского национального парка (КНП) находится на фоновом для севера Европейской части России уровне. Для многих тяжелых металлов, осевших из атмосферы на лесную экосистему КНП, основным источником является литогенный, а для токсичных Cd, Sb, Pb и Bi – антропогенный.



**Рис. 2.** Коэффициенты обогащения кустистых эпифитных лишайников (КО) относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры [12]. Столбики показывают среднее значение, а “усы” отражают минимальные и максимальные значения

Авторы благодарят учеников Школы № 1553 имени В.И. Вернадского биогеохимической специализации за помощь в сборе материала, М.П. Журбенко за определение видового состава лишайников и В.К. Карандашева за элементный анализ проб. Обобщение результатов исследований выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.П., Алиев Р.А., Бобров В.А. и др. Эоловый материал в природных архивах // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 70–107.
2. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
3. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants. An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. Berlin: Springer, 1998. 324 p.
4. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 648 с.
5. Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений. Учебное пособие. 2-е издание. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2016. 300 с.
6. Василевич М.И., Василевич Р.С. Особенности накопления тяжелых металлов эпифитными лишайниками в таежной зоне фоновых территорий Европейского Северо-Востока России // Экология. 2018. № 1. С. 17–23.
7. Abas A. A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges // Ecological Indicators.

2021. V. 121. Article 107197.

8. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Кутенков С.А. и др. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 3. URL: [www.science-education.ru/97-4692](http://www.science-education.ru/97-4692).

9. Шевченко В.П., Саввичев А.С., Болотов И.Н. и др. Накопление тяжелых металлов кустистыми эпифитными лишайниками водосбора Онежского залива Белого моря // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022». Т. I (IV). Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2022. С. 306–309.

10. Пчелкин А.В. Первичные сведения о лишенобиоте государственного природного заказника «Лекшмох» // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2019. Т. 30. № 3–4. С. 38–49.

11. Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.В., Бурмий Ж.П. Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.

12. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2003. V. 3. P. 1–63.

13. Катаева М.Н., Беляева А.И. Содержание микроэлементов в некоторых видах эпифитных лишайников Юго-Восточного Приладожья // Растительные ресурсы. 2018. Т. 54. № 4. С. 542–558.

14. Peralta-Videa J.R., Lopez M.L., Narayan M. et al. The biogeochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain // The International Journal of Biochemistry & Cell Biology. 2009. V. 41. P. 1665–1677.

15. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M. et al. Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas // Berichte zur Polarforschung. 1995. V. 176. P. 7–16.

16. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос тяжелых металлов в районы севера европейской территории России // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 108–116.

This paper summarizes the results of a study of heavy metal accumulation by fruticose epiphytic lichens in Kenozersky National Park (KNP), located in the catchment area of the Onega Bay of the White Sea. It is shown that the heavy metal content in these lichens is at background levels for the northern European part of Russia. For many heavy metals deposited from the atmosphere onto the KNP forest ecosystem, the primary source is lithogenic, while for toxic Cd, Sb, Pb, and Bi, the primary source is anthropogenic.

*Научное издание*  
*Сборник*

ISBN 978-5-6051054-9-7

DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-9-7>

**Геология морей и океанов**  
**Материалы XXVI Международной научной конференции**  
**(Школы) по морской геологии.**

**Том III.**

**Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,**  
**2025. – 282 с.**

ISBN 978-5-6051054-9-7



ISBN 978-5-6051054-9-7