

Обзорная статья

УДК: 552.578:551.464.6+62-623.1(268.5)

DOI: 10.31857/S0869769824040015

EDN: IRWLDY

## Баланс парниковых газов и изменение климата: роль деградации мерзлоты в Арктике

И. П. Семилетов<sup>✉</sup>, Н. Е. Шахова

*Игорь Петрович Семилетов*

член-корреспондент РАН, доктор географических наук

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Международный Центр Дальневосточных и Арктических морей

им. адмирала С. О. Макарова, Сахалинский государственный университет-СахалинТЕСН,

Южно-Сахалинск, Россия

ipsemiletov@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

*Шахова Наталья Евгеньевна*

доктор геолого-минералогических наук

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

nataliaeshakhova@gmail.com

**Аннотация.** Одной из наиболее актуальных проблем современной геохимии и климатологии является вопрос о закономерностях миграции основных парниковых газов, двуокси углерода ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ). Целью данной работы является краткое изложение принятой концепции о доминирующей роли антропогенного фактора в изменениях климата, которая рассматривается в контексте изменения природной климатической цикличности за последние сотни тысяч лет и в наше время. Показано, что для понимания функционирования климатической системы необходимо учитывать геологический фактор – изменение состояния наземной и подводной мерзлоты: крупнейшие резервуары древнего углерода, который включается в биогеохимические циклы вследствие деградации мерзлоты в теплые геологические эпохи. Это приводит к нарушению цикла углерода, которое проявляется в массивированных выбросах  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферу. В холодные геологические эпохи идет аккумуляция углерода в мерзлоте, которая запасает количества углерода, соизмеримые или даже превышающие быстрые обменные резервуары углерода на нашей планете (атмосфера, биосфера). На примере Арктического региона показана важнейшая, и пока неучтенная, климатическая роль деградации мерзлоты в период после оптимума голоцена, который наступил в Северном полушарии примерно 5–6 тыс. лет назад. Согласно известной климатической 105-тысячелетней цикличности по Миланковичу, после оптимума голоцена должно было наступить очередное похолодание, ведущее к понижению уровня моря и превращению мелководного арктического шельфа в сушу. Однако потепление продолжилось, и уровень Мирового

океана продолжает повышаться, что уже привело к беспрецедентному в геологической истории продолжительному высокому стоянию уровня моря на арктическом шельфе. Это стало причиной контакта относительно теплых придонных вод и мерзлых осадков арктического шельфа на 5–6 тыс. лет дольше, чем в предыдущие теплые геологические эпохи, что привело к прогрессирующей деградации подводной мерзлоты и дестабилизации арктических мелководных гидратов. Показано, что возрастающий сток сибирских рек, мобилизация, транспорт и трансформация наземного органического вещества в арктической системе суша–шельф определяет седиментацию и экологию мелководного шельфа морей Восточной Арктики, которая составляет более 70% акватории Северного морского пути. В данной обзорной работе приведены избранные результаты, полученные авторами с коллегами за последние 30 лет, и обозначен ряд проблем, которые стоят перед современной климатологией.

**Ключевые слова:** цикл углерода, парниковые газы, мерзлота, климат

**Для цитирования:** Семилетов И. П., Шахова Н. Е. Баланс парниковых газов и изменение климата: роль деградации мерзлоты в Арктике // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 4. С. 5–43.  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824040015>

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-77-30001, грант № 22-67-00025) и Минобрнауки в рамках Программы развития “Приоритет-2030” Сахалинскому государственному университету, и госзадания № 121021500057-4 (ТОИ ДВО РАН).

Review article

## Greenhouse gases balance and climate change: role of permafrost degradation in the Arctic

I. P. Semiletov, N. E. Shakhova

*Igor P. Semiletov*

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Geography  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
International Center of the Far-Eastern and Arctic Seas (named by admiral S.O. Makarov),  
Sakhalin State University/SakhTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
[ipseiletov@gmail.com](mailto:ipseiletov@gmail.com)  
<http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

*Natalia E. Shakhova*

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, Russia  
[nataliaeshakhova@gmail.com](mailto:nataliaeshakhova@gmail.com)

**Abstract.** One of the most prominent problems of modern geochemistry and climatology is the understanding of the patterns of migration of the main greenhouse gases, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>). The purpose of this work is a brief review of the widely accepted concept of the dominant role of the anthropogenic factor in climate change, which is considered in the paleo-context of changes in natural climate cycling over the past hundreds of thousands of years, and in present time. It is shown that to understand the functioning of the climate system, it is necessary to take into account the geological factor – changes in the state of terrestrial and subsea permafrost: the huge reservoirs of ancient carbon, which is included in biogeochemical cycles due to permafrost degradation in warm geological epochs. This leads to imbalance in the carbon cycling, which manifests itself in massive emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> into the atmosphere. During cold geological epochs, carbon accumulates in permafrost, which stores amounts of carbon exceeding the carbon exchange between atmosphere, biosphere, land and ocean. Considering the Arctic region as the key climate “kitchen” we state that present time is characterized by unique long-lasting

warming after the Holocene optimum, which occurred in the northern hemisphere approximately 5–6 thousand years ago. It contradicts with the Milankovich' 105-kyrs cycling: after the Holocene optimum, the geological ice-epoch should have occurred, which should have led to about 100-meters sea level lowering and the transformation of the shallow Arctic shelf into land. However, warming has continued and the level of the World Ocean continues to rise, which has already led to an extended high sea level on the Arctic shelf – unique in geological history. This caused the lasting contact of relatively warm bottom waters (~(-1) °C) and frozen sediments (~(-25) °C) of the Arctic shelf for 5–6 thousand years longer than in previous warm geological epochs, which led to the progressive degradation of subsea permafrost, formation of deep or through taliks (zones of melted permafrost) and destabilization of Arctic shallow hydrates. It is shown that the increasing runoff of Siberian rivers, mobilization, transport, and transformation of terrestrial organic matter in the Arctic land–shelf system determines the sedimentation and biogeochemistry of the East Siberian Arctic Shelf – the broadest and shallowest shelf in the World Ocean, which makes up more than 70% of the Northern Sea Route area. This review paper presents selected key results obtained by the authors and their colleagues over the past 30 years, and identifies a number of problems facing modern climatology.

**Keywords:** carbon cycle, greenhouse gases, permafrost, climate

**For citation:** Semiletov I.P., Shakhova N.E. Greenhouse gases balance and climate change: role of permafrost degradation in the Arctic. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(4):5–43. (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824040015>

**Funding.** The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 21-77-30001, grant No. 22-67-00025), the Ministry of Education and Science within the framework of the Priority-2030 Development Program for Sakhalin State University, and state assignment No.121021500057-4 (POI FEB RAS).

## Введение

На протяжении сотен миллионов лет только малая часть приходящей солнечной радиации (0,06%) употреблялась в процессе фотосинтеза, что и стало основой жизни на Земле и ее продукта – ископаемого топлива. До последнего времени человечество развивалось за счет его использования и не осознавало, что запасы природного топлива истощаются со скоростью в 100 тыс. раз большей, чем они формируются. Наиболее ранние свидетельства об использовании энергии сжигаемого топлива для обогрева пещер, заселенных нашими предками на территории нынешнего Китая, относятся к 400 тыс. лет до н. э. Тогда, на заре человечества, в силу малочисленности и неразвитости технологий антропогенная активность не оказывала значительного влияния на изменение климата. С периодичностью в 105 тыс. лет межледниковые периоды сменялись ледниковыми, море отступало и наступало на сушу с амплитудой от 100 до 130 м на протяжении многих сотен тысяч лет. В межледниковые эпохи средняя температура воздуха была на 6–7 °C выше, чем в ледниковые. Наибольшие амплитуды климатических колебаний были документированы в Арктике, где потепление в теплые геологические эпохи достигало 10–12 °C, т.е. примерно в 2 раза выше, чем в среднем на планете [1–6]. Это явление было названо арктическое усиление (*arctic amplification*) [7].

После климатического оптимума (*температурного максимума*) последнего межледниковья – голоцена, который прошел 5–9 тыс. лет назад (раньше в Северном полушарии и позднее – в Южном), по законам природы должно было наступить глобальное похолодание. Однако вместо похолодания потепление продолжилось, что привело к продолжению таяния покровных ледников, деградации многолетних мерзлых пород (далее – *мерзлота*) и повышению уровня океана. На основе комплексного изучения воздушных включений датированных образцов ледяных кернов Антарктиды и Гренландии и кернов донных осадков научное сообщество пришло к выводу, что наиболее вероятным фактором изменения климатической цикличности является нарушение природного цикла углерода за счет антропогенного фактора, который проявляется в выбросах парниковых газов CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> – за счет сжигания ископаемого топлива, сведения лесов и другой хозяйственной деятельности [1–11]. Однако вопрос о роли антропогенной деятельности в ретроспективе 5–9 тысяч лет назад пока остается открытым из-за недостатка научно обоснованных данных.

По определению основоположника современной биогеохимии академика В.И. Вернадского, антропогенный фактор стал новой геологической силой, которая изменяет лик нашей

планеты в масштабе последних сотен лет и называется ноосфера, или антропоцен [12]. После начала промышленной революции, с 1750 г., в результате деятельности человека в атмосферу выделилось более 555 Гт (1 Гт = 1 млрд т) углерода (*оценка для 2015 г.*) в форме CO<sub>2</sub> (C-CO<sub>2</sub>), что привело к нарушению природного цикла углерода и повышению концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> до значений, невиданных за последние 800 тыс. лет, и к задержке наступления очередного ледникового периода [13]. Только за 1958–1988 гг. в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива поступило 123 млрд т углерода в форме CO<sub>2</sub> (C-CO<sub>2</sub>), что эквивалентно примерно 16% от общего количества CO<sub>2</sub> в современной атмосфере. Темпы роста атмосферного CO<sub>2</sub> увеличиваются. Предполагается, что в ближайшие годы произойдет удвоение содержания атмосферного CO<sub>2</sub> относительно 1750 г., что приведет к потеплению на 1,5–2,0 °С. Это может вызвать серьезные социальные и экономические последствия [8, 9, 14]. Ниже показано, что наибольшие темпы климатических изменений происходят в Арктике, что уже привело к аномальному потеплению, значительно превышающему prognostические оценки Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) – International Panel for Climate Change (IPCC), которые основаны на предположении о том, что антропогенный фактор является определяющим драйвером климатической системы [8, 9, 14]. Однако для понимания функционирования климатической системы необходимо также учитывать другие факторы, которые могут играть важную роль в наше время и в различные геологические эпохи – за счет сложного взаимодействия множества пока малоизвестных положительных и отрицательных обратных связей [1–8].

В настоящее время развитие мировой климатологии испытывает трудности, обусловленные в первую очередь недостатком знаний о степени влияния антропогенных и естественных факторов на изменение климата. Это приводит к большому количеству неопределенностей в функционировании климатической системы нашей планеты и вызывает ряд серьезных проблем, связанных с планированием развития в области энергетики, что определяет социально-экономическое развитие всех стран. Поэтому вопрос о климатической безопасности становится одним из геополитических приоритетов. В этом контексте Российская Федерация (РФ) занимает особое положение, так как примерно 2/3 территории РФ находится в зоне деградирующей вечной мерзлоты, которая является хранилищем органического углерода (ОУ) планетарного масштаба [8, 15].

В данном исследовании кратко изложены основные достижения и проблемы современной климатологии, дополненные избранными результатами 30-летних комплексных авторских исследований и демонстрирующие важную роль геологического фактора – в контексте изменения состояния наземной и подводной мерзлоты: крупнейшего резервуара древнего углерода (С), который включается (мобилизуется) в биогеохимические циклы вследствие деградации мерзлоты в теплые геологические эпохи. Это приводит к нарушению цикла углерода, проявляющемуся в массивированных выбросах CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосферу.

## **1. О роли парниковых газов в климатических изменениях**

Наибольшие климатические изменения происходили на арктическом шельфе России – величайшем шельфе нашей планеты, площадь которого составляет почти 1/3 от всего Северного Ледовитого океана и 1/4 от общей площади шельфа Мирового океана. Если посмотреть на карту Северного полушария, где указаны глубины морей, то, приняв глубину в 100 м как край суши в ледниковые периоды, в первом приближении (без учета вертикальных движений земной коры) можно представить, как далеко к северу смещалась береговая линия в ледниковые периоды (рис. 1).

На рис. 1 показано, что максимальное увеличение температуры поверхности в первой декаде XXI в. зарегистрировано над акваторией и прибрежной зоной самого широкого и мелководного шельфа Мирового океана – морями Восточной Арктики (МВА) и прилегающей частью суши; ~80% подводной мерзлоты Арктики (окрашено в сиреневый цвет) находится в МВА [18–21]. Северный край этой зоны примерно совпадает с бровкой современного шельфа, которая соответствует границам суши, бывшей во время оледенения при понижении уровня примерно на 100–120 м [18–21].

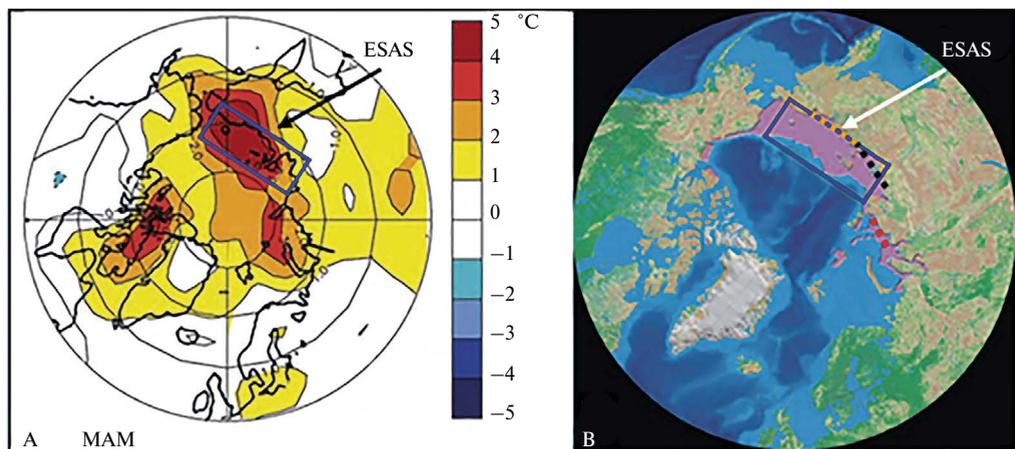


Рис. 1. Аномалии в увеличении температуры воздуха в первой декаде XXI в., зарегистрировано над акваторией МВА (или ESAS: East Siberian Arctic Shelf) и прилегающей части суши (А); распределение подводной мерзлоты Арктики (окрашено в сиреневый цвет) (В). Модифицировано на основе работ [16–20].

**Что же является причиной климатической изменчивости?** Этот вопрос волнует научное сообщество с давних времен. На сегодня сложилось мнение, что «толчком» для смены режимов потепления–охлаждения планеты является изменение интенсивности приходящей солнечной энергии, что обусловлено астрономическими факторами. Однако этой причины явно недостаточно для обеспечения наблюдаемых глобальных изменений: малые изменения в потоках приходящей солнечной энергии играют только роль «триггера-переключателя», а дальше работает пока малопонятный набор положительных и отрицательных обратных связей климатической системы. Начиная с конца XIX в., когда С. Аррениусом и О. Чамберленом было сформулировано понятие «парникового эффекта», обусловленного повышением содержания атмосферной  $\text{CO}_2$ , научным сообществом обсуждается роль увеличения атмосферного  $\text{CO}_2$  в современном глобальном потеплении [8–12, 22–25].

Одной из наиболее актуальных проблем современной геохимии и климатологии является вопрос о закономерностях миграции основных парниковых газов,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Как известно, наиболее подвижным звеном в круговороте углерода является обмен этих газов, которые представляют собой продукты аэробной ( $\text{CO}_2$ ) или анаэробной деструкции ( $\text{CH}_4$ ) органического углерода морского или наземного генезиса. Дисбаланс в глобальном цикле углерода проявляется в первую очередь в изменении атмосферного резервуара (пула)  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , емкость которого определяется направлением и скоростями обмена с основными обменными резервуарами геосфер (атмосфера, биосфера, гидросфера, литосфера, криосфера).

Вариации содержания атмосферного  $\text{CO}_2$  – основного парникового газа в масштабе  $10^0$ – $10^3$  лет – обычно ассоциируются с изменчивостью обменных процессов между атмосферой, биосферой и океаном, на которые накладывается возрастающая антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$  в атмосферу. В наше время вследствие хозяйственной деятельности (сжигания ископаемого топлива, сведения лесов и т.д.) ежегодно в атмосферу поступает примерно  $8\text{--}9 \times 10^{15}$  г избыточного атмосферного углерода (С) в форме  $\text{CO}_2$ . Около половины антропогенного  $\text{CO}_2$  остается в атмосфере, что и проявляется в усилении парникового эффекта [8–13]. Другая часть антропогенного  $\text{CO}_2$  поглощается Мировым океаном и, по-видимому, расходуется на дополнительный прирост наземной фитомассы (растительности).

Вторым по значимости парниковым газом в атмосфере в настоящее время является  $\text{CH}_4$ , концентрация которого составляет всего около 0,5% от  $\text{CO}_2$ . Все возрастающий интерес к изучению этого компонента атмосферы объясняется тем, что радиационная активность метана в 20–35 раз выше, а темпы увеличения концентрации примерно в 2–4 раза выше,

чем у  $\text{CO}_2$  [8, 9]. Вклад от увеличения содержания атмосферного  $\text{CH}_4$  в парниковый эффект оценивается примерно в 30% от вклада  $\text{CO}_2$ . Однако имеются экспериментальные и модельные оценки, указывающие, что для 20-летнего диапазона радиационная эффективность молекула-к-молекуле  $\text{CH}_4$  превосходит таковую  $\text{CO}_2$  в 84 раза. Экспериментальные данные показали, что в последние десятилетия прошлого века рост концентрации основных парниковых газов в атмосфере составлял:  $\text{CO}_2$  – 0,4% и  $\text{CH}_4$  – 0,3–1,2% в год, что ассоциировалось с антропогенной деятельностью. Начиная с 2007 г. зарегистрировано увеличение скорости прироста атмосферного метана в высоких широтах Северного полушария, что привело к накоплению дополнительного количества  $\text{CH}_4$  неизвестного генезиса в атмосфере [26]. Возможным дополнительным источником поступления  $\text{CH}_4$  в атмосферу высоких широт Северного полушария является атмосферная эмиссия  $\text{CH}_4$  вследствие деградации наземной и подводной мерзлоты шельфа Северного Ледовитого океана, где органическое вещество накоплено в количестве, намного превышающем атмосферный пул основных парниковых газов [17–21, 23]. Авторы данной работы 30 лет назад предложили гипотезу о возрастающей роли деградации подводной мерзлоты и дестабилизации гигантских запасов арктических шельфовых гидратов метана в качестве основного природного источника  $\text{CH}_4$  в высоких широтах Северного полушария, в дополнение к эмиссии  $\text{CH}_4$  из термокарстовых северных озер [17, 21, 27–32].

В настоящее время научное сообщество все больше склоняется к мнению о том, что климатические изменения, связанные с парниковым эффектом, проявляются не только в повышении среднепланетарной температуры, но и в интенсификации атмосферной циркуляции, особенно в высоких широтах Северного полушария, что приводит к повышению частоты экстремальных гидрометеорологических явлений [33]. Результаты моделирования климата Земли показали, что без включения антропогенных факторов сложно получить правдоподобное объяснение наблюдаемых в прошедшие два столетия изменений температуры. Однако **существует ряд неопределенностей**. Например, нет понимания причин отсутствия ожидаемой положительной связи между похолоданием после предыдущей межледниковой эпохи и изменением содержания атмосферного  $\text{CO}_2$ , которое на протяжении этого времени практически не понижалось и оставалось относительно высоким [25, 34]. Из рассмотрения рис. 2 следует, что на протяжении 8 тыс. лет наблюдалось похолодание примерно на 8 °С, при сохранении высокой концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , которая была характерна для предыдущих межледниковых эпох (280 ppm). Другой пример: по результатам модельных экспериментов, даже при условии полного прекращения выброса антропогенного  $\text{CO}_2$

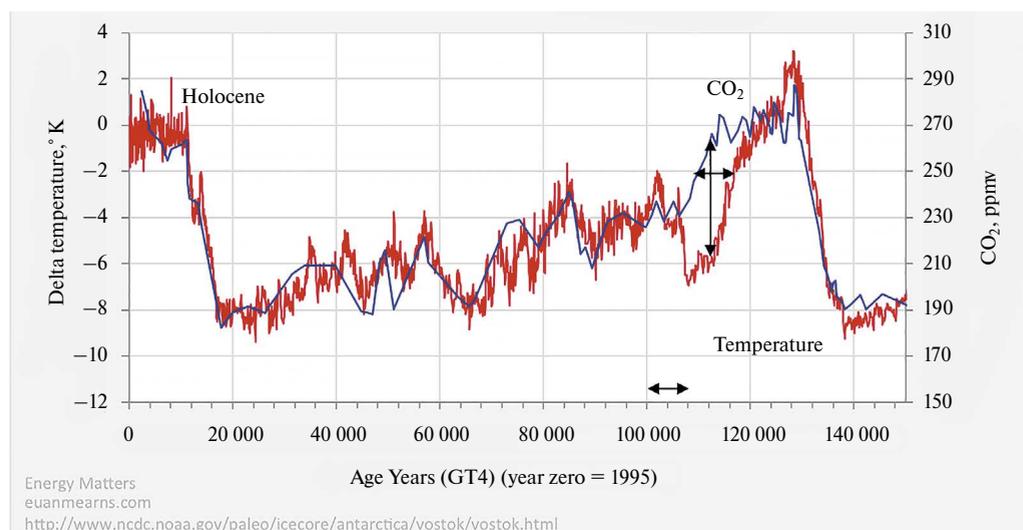


Рис. 2. «Отставание» понижения концентраций  $\text{CO}_2$  от понижения температуры (Т), достигшее 8 тыс. лет в предыдущий межледниковый период [34].

в атмосферу, потепление будет продолжаться не менее 1000 лет [35], что не учитывается в современной теории климата и социально-экономических моделях.

Проведенные в последние десятилетия исследования  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  по данным глубокого бурения ледников показали, что ледниково-межледниковая цикличность проявляется в форме не только физических и химических, но и биологических изменений [10, 11, 22]. При этом вклад собственно вариаций содержания  $\text{CO}_2$  в максимальное изменение глобальной температуры, составляющей  $11^\circ\text{C}$ , считается равным примерно  $0,6^\circ\text{C}$ , а с учетом вариаций  $\text{CH}_4$  –  $0,7^\circ\text{C}$  [3, 5, 24].

Согласно результатам исследований климата плейстоцена относительно небольшие вариации орбитальных сил, вероятно, приводили к изменению общей инсоляции не более чем на 0,6% за последний миллион лет [24]. Этот эффект многократно усиливался из-за воздействия механизма обратных связей в системе атмосфера–океан–биосфера–криолитосфера. Краткий обзор вопросов, связанных с особенностями взаимодействия атмосферного  $\text{CO}_2$ , океана, суши, биоты и климата, приведен в [27, 36, 37]. В этой, пока малопонятной цепи причин и следствий климатических изменений,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и другим радиационно-активным малым воздушным примесям отводится роль триггера [1–8, 24]. В последнее десятилетие XX в. стала обсуждаться еще одна возможная причина климатических изменений, долговременных в масштабе истории человеческой цивилизации и быстрых в геологическом масштабе времени. Это так называемая метановая катастрофа – выделение большого количества метана из газовых гидратов, находящихся в недрах Земли [38–40]. Наиболее реалистичной причиной быстрых климатических изменений была названа дестабилизация мелкозалегающих арктических шельфовых гидратов. Однако до начала проведения комплексных исследований МВА авторским коллективом в конце 1990-х–начале 2000-х, доказавших прогрессирующую деградацию подводной мерзлоты МВА и массивированные выбросы  $\text{CH}_4$  из донных отложений в водную толщу–атмосферу [17, 20, 21, 31], было принято считать, что климатическая опасность от так называемой *метановой бомбы* отсутствует, по крайней мере на ближайшие сотни лет – по причине квазистабильного состояния системы подводная мерзлота–гидраты [8, 9, 39].

Сильным аргументом в поддержку климатической значимости парникового эффекта являются результаты сравнения анализов датированных образцов воздушных включений в ледяных колонках льда Антарктиды и Гренландии. Оказалось, что коэффициент корреляции между средней температурой и содержанием  $\text{CO}_2$  и метана ( $\text{CH}_4$ ) – второго по значимости парникового газа, очень высок (0,7–0,8) на протяжении последних сотен тысяч лет [2, 41], несмотря на отсутствие синфазного изменения концентрации  $\text{CO}_2$  и климатической кривой на протяжении многих тысяч лет (рис. 2). Исходя из выявленной климатической цикличности в распределении изотопной температуры и состава атмосферы и без учета влияния ноосферы (антропоцена), наше время (наступившее после оптимума голоцена, 5–6 тыс. лет назад) должно было стать стадией глобального похолодания. Но вместо этого потепление продолжилось. Предполагается, что антропогенный тренд атмосферного  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  накладывается на естественную климатическую изменчивость в содержании этих газов, характерную для межледниковых эпох, что приводит к нарушению природного цикла углерода и проявляется в виде глобального потепления климата. Однако это предположение остается дискуссионным, так как нет свидетельств значимости антропогенного фактора 5–6 тыс. лет назад. Нам известны только две работы, которые дают основания согласиться с тем, что начиная с 600 г. до н. э. антропогенная эмиссия  $\text{CH}_4$  уже была значимой [42, 43].

Результаты сравнительного анализа изменчивости содержания  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере полярных регионов (прямые измерения в воздушных включениях древних кернов льда в Гренландии и Антарктиде) за последние 130 тыс. лет показали, что в ледниковые эпохи концентрации были примерно в 2 раза ниже, чем в межледниковые эпохи [1–6, 44–46]. Причем в межледниковые эпохи наблюдались различия между полюсами, сходные с современным распределением – с наличием максимума  $\text{CO}_2$  (примерно на 1–2%) и  $\text{CH}_4$  (8–10%) над Гренландией (Арктикой) по сравнению с Антарктидой (рис. 3). Было показано, что начиная с максимума последнего оледенения (18 тыс. лет назад) до нашего времени средняя температура воздуха на Земле повысилась примерно на  $5^\circ\text{C}$ , а в Гренландии – на  $20^\circ\text{C}$  [47]. Это привело к значительному потеплению и усилению термокарста в мерзлых породах

«затопляемого шельфа» во время трансгрессии моря [48–49], что вызвало формирование множества термокарстовых озер с глубокими и сквозными таликами, которые стали основой для образования газопроводящих каналов разгрузки пузырькового  $\text{CH}_4$  на современном шельфе МВА. Важно, что в ледниковые эпохи среднегодовая температура воздуха была примерно на  $20^\circ\text{C}$  ниже, а также уровень моря был на 100–120 м ниже, чем в настоящее время, и градиенты в распределении  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  между полюсами отсутствовали [45–46], что позволило сформулировать гипотезу об определяющей роли состояния подводной мерзлоты как основного регионального источника  $\text{CH}_4$  в теплые межледниковые эпохи [17, 21].

Данные глобального атмосферного мониторинга показали, что в наше время планетарный максимум в распределении  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  также находится не над умеренными широтами (в полосе  $20\text{--}60^\circ$  с. ш., где сжигается свыше 90% ископаемого топлива), а над Арктикой/Субарктикой [17, 20, 21, 31, 32], где антропогенная активность относительно невелика (менее 5% добываемого ископаемого топлива сжигается между  $60^\circ$  и  $70^\circ$  с. ш.). Это значит, что в межледниковые периоды в северных широтах существует мощный природный источник  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , и это проявляется в существовании межполюсного градиента в меридиональном распределении  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ : в увеличении среднего содержания атмосферного  $\text{CO}_2$  примерно на 3  $\mu\text{атм}$  (около 1% от средней величины) и  $\text{CH}_4$  на 0,15–0,17  $\mu\text{атм}$  (8–10% от средней величины) над Арктикой по сравнению с Антарктикой (рис. 3).

В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос о механизме формирования планетарного максимума  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в атмосфере, что может свидетельствовать о важной роли Северного Ледовитого океана (далее – СЛО), окруженного наземной и подводной мерзлотой, в современных климатических изменениях, которые в наиболее явном виде проявляются в Арктике. В последние десятилетия наибольшее потепление зарегистрировано над Аляской и в российском секторе Восточной Арктики (МВА), где находится примерно 80% подводной мерзлоты СЛО (рис. 1), деградация которой приводит к дестабилизации гигантского пула гидратов и массивованным выбросам  $\text{CH}_4$  [17].

Впервые гипотеза о климатической роли геологического фактора – массивованной эмиссии атмосферного метана в результате деградации мерзлоты и развитии наземного термокарста – северных озер была сформулирована в 1990-х [27–30, 36, 37] и развита авторами в начале 2000-х – на основе открытия массивованной разгрузки  $\text{CH}_4$  из гигантских запасов донных отложений МВА в атмосферу – вследствие прогрессирующей деградации подводной мерзлоты [17, 20, 21, 31, 32]. Теоретические основы этой гипотезы были заложены в работах академика И. С. Грамберга и В. А. Соловьева с коллегами из ВНИИОкеангеологии, группой профессора Н. Н. Романовского из МГУ [18, 19, 48, 49].

В настоящее время в области исследования газообразных компонентов океанического углеродного цикла сложилась парадоксальная ситуация: ни у кого не вызывает сомнения тот факт, что СЛО и Арктический регион в целом наиболее чувствительны к глобальным изме-

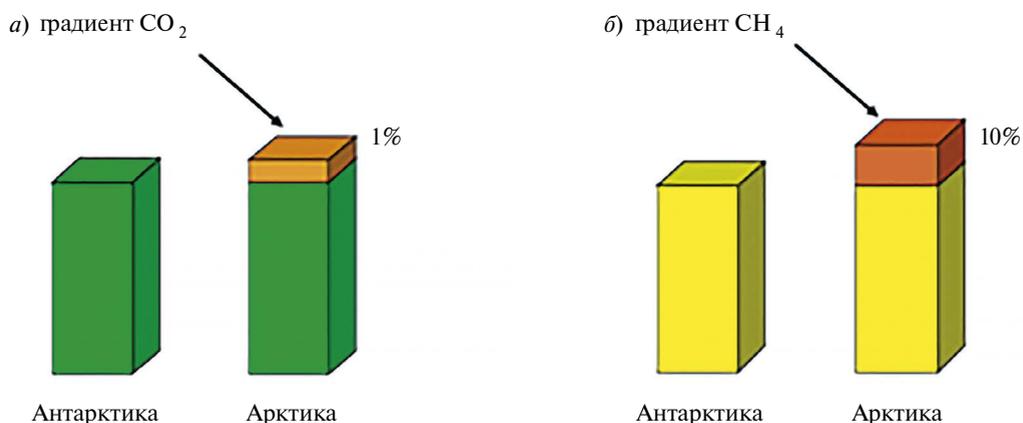


Рис. 3. Межполюсный градиент концентраций: а – атмосферного  $\text{CO}_2$ , б – атмосферного  $\text{CH}_4$ .

нениям [8, 9], но в то же время исследования по миграции и динамике продуктов аэробного ( $\text{CO}_2$ ) или анаэробного ( $\text{CH}_4$ ) разложения ОВ в СЛО и их обмена с атмосферой практически игнорируются [50, 51]. Более того, СЛО в работе [51] даже не упоминается как часть Мирового океана. То есть мировое сообщество приходит к консенсусу о том, что глобальное потепление обусловлено парниковым эффектом, который в наиболее явном виде проявляется в Арктике, однако стоки и источники парниковых газов в морях СЛО до последнего времени были мало изучены. Более того, «наиболее репрезентативные» модели эволюции климата, обобщенные в [8, 9, 14] и основанные на предположении, что к концу 21-го века содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере удвоится за счет антропогенной деятельности, не учитывают возможное увеличение содержания  $\text{CH}_4$ , вклад которого в парниковый эффект может стать соизмеримым и даже более значимым (вследствие деградации морской подводной мерзлоты и газидратов, усиления развития субэдрального и подводного термокарста, эволюции озер и подозерных/русловых таликов), чем вклад антропогенного  $\text{CO}_2$ , при условии, что глобальное потепление будет происходить и в ближайшем будущем [9–11, 14].

**Основной целью настоящей работы** является выявление характерных особенностей изменчивости углеродного цикла в системе атмосфера–океан–суша, которые приводят к нарушению баланса между обменными резервуарами углерода и изменяют результирующие потоки основных парниковых газов. Поскольку в наше время наиболее значительное потепление и максимальные концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в атмосфере наблюдаются в высоких широтах Северного полушария [17, 20, 21, 31, 32], эта работа посвящена выявлению и обсуждению основных процессов, связывающих изменения на шельфе СЛО и окружающей его суше с характерными особенностями углеродного цикла, динамикой  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  и климатом. На основе оригинальных и литературных данных показано, что СЛО, окруженный обширной деградирующей наземной мерзлотой, является интегратором изменений, происходящих в водосборах арктических рек и на побережье. Установлено, что среди аллохтонных источников органического вещества (ОВ) важнейшими для биогеохимического режима являются речной сток (растворенное ОВ), а также эрозия берегов (взвешенное ОВ), сложенных ледовым комплексом. Показано, что окисление эрозионного взвешенного ОВ и ОВ терригенных осадков обширного шельфа МВА являются источником поступления  $\text{CO}_2$  в водную толщу и в атмосферу. Обсуждается климатическая роль деградирующей подводной мерзлоты. Она перестает быть газонепроницаемой крышкой для огромного пула  $\text{CH}_4$  в форме гидратов, природного газа, и собственно ОВ донных осадков, которые при вовлечении в современный биогеохимический цикл могут трансформироваться в  $\text{CH}_4$  [20, 54, 55]. Показано, что основным источником притока  $\text{CH}_4$  в водную толщу–атмосферу является пузырьковый перенос, позволяющий избежать окисления в слое сульфатредукции в донных осадках и в воде [17, 52, 53, 56, 57].

### **1.1. Характерные особенности цикла органического углерода в арктических морях России и его несбалансированность**

Более 40 лет назад было показано, что главной и наиболее резко выраженной чертой распределения процентных концентраций и абсолютных масс ОВ в Мировом океане является циркумконтинентальная зональность, выражающаяся в уменьшении абсолютных масс ОВ на два порядка при переходе от терригенных осадков подводных окраин к красным глубоководным глинам [58]. В результате в периферических районах океана, охватывающих шельфы и континентальные склоны, захороняется >80% ОВ всего Мирового океана. В СЛО (где площадь шельфа составляет половину от общей площади океана) это привело к формированию мощного чехла осадочных отложений на шельфе, который называют мегапулом ОВ планетарного масштаба [58–60].

На протяжении последнего ледниково-межледникового цикла наибольшие в СЛО изменения происходили на арктическом шельфе России – величайшем шельфе нашей планеты, площадь которого (4,66 млн км<sup>2</sup>) составляет почти 1/3 от площади всего Северного Ледовитого океана и 1/4 от общей площади шельфа Мирового океана. Поэтому биогеохимические процессы, определяющие цикл углерода в этих морях, в значительной степени определяют

общий характер функционирования всей экосистемы СЛО. Если посмотреть на карту арктического шельфа (рис. 1, В), где указаны глубины морей, то, приняв глубину в 100–120 м как край суши в ледниковые периоды [17, 21, 48, 49], в первом приближении (без учета вертикальных движений земной коры) можно представить, как далеко (до 800 км) к северу смещалась береговая линия в ледниковые периоды: Евразия и Америка соединялись в один континент через Берингов мост (на сегодня это мелководный пролив), арктические острова были частью континентов, где еще совсем недавно (последние находки костей мамонтов на о-ве Врангеля датируются возрастом всего 3–5 тыс. лет) паслись стада мамонтов, бизонов и лошадей, на которых охотились наши предки. В это время среднегодовая температура воздуха была на 8–10 °С ниже, чем в наше время, что приводило к формированию мощной мерзлоты, затопленной океаном во время последней трансгрессии [17, 21, 48, 49]. До последнего времени было распространено мнение о том, что подводная мерзлота подвергается термическим изменениям, но остается стабильной, т.е. слабо подверженной донной эрозии и вовлечению органического углерода (ОУ) мерзлоты, которая остается непроницаемой для миграции газов. Поэтому роль подводной мерзлоты СЛО в современных биогеохимических процессах ранее не обсуждалась.

В работе Е. А. Романкевича и А. А. Ветрова [59], обобщающей основные данные, накопленные до 2000 г., показано, что цикл углерода в арктических морях России (АМР) является важной частью глобального углеродного цикла. Действие циркумконтинентального закона размещения потоков и масс углерода в океане и накопления углерода на дне еще более усиливается в АМР, по мнению авторов, из-за мощного поступления биогенных элементов и органического вещества со стоком сибирских рек, большой роли маргинальных биогеохимических фильтров и ледовитого литогенеза в целом. Согласно оценкам, выполненным Романкевичем и Ветровым, общий суммарный поток органического углерода в АМР, достигающий дна, составляет около 83 Тг-С в год, из которых около 74 Тг-С в год (или 89% от поступившего на дно ОУ) минерализуется на дне. Из этого следует, что в донных отложениях арктических морей России откладывается в осадок в целом около 9 Тг-С в год, т.е. примерно столько же, сколько в пелагиали всего Мирового океана. Столь высокая несбалансированность цикла углерода в морях Российской Арктики является одной из наиболее ярких особенностей полярного литогенеза и состава захороняющегося органического вещества [59, 60].

Суммируя оценки баланса органического углерода в морях Российской Арктики, осредненные для голоцена Р. Штейном и Р. Макдональдом [62], получаем величину, равную примерно 7 Тг-С в год. Превышение количества современного ОУ, захороненного на шельфе АМР, 9 Тг-С в год [60], относительно среднеголоценового значения на 2 Тг-С в год может быть объяснено увеличением приходной части отложенного органического углерода в условиях глобального потепления (например, ростом скорости береговой эрозии, твердого и жидкого расхода рек, ростом первичной продукции). Принимая соотношение баланса масс осаждаемого и минерализованного ОУ в соответствии с расчетами по Романкевичу и Ветрову [60], получается, что в наше время примерно на 33,2 Тг-С больше поступает в донные отложения АМР по сравнению с величиной, осредненной для голоцена.

В обобщающих работах [58–60, 62] показано, что роль газообразных компонентов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) в цикле углерода в арктических морях пока не может быть оценена по причине отсутствия данных. Этот пробел был восполнен работами лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН), проведенными в 1999–2022 гг. совместно с группой академика Л.И. Лобковского из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), другими институтами РАН и зарубежными коллегами из университетов США, Швеции, Италии, Норвегии, Великобритании, Нидерландов. Основным зарубежным партнером является Шведская Королевская академия наук, представленная группами академиков Орьяна Густафсона и Мартина Якобсона из Стокгольмского университета и Лейфом Андерсоном из Гетеборгского университета. Данные были получены в 52-летних и зимних экспедициях в моря Российской Арктики, в основном в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых (рис. 4). В 2018–2022 гг. комплексные исследования были также выполнены в Карском море, где проводились аналогичные исследования.

Результаты исследований были опубликованы в более чем 300 статьях в известных мировых изданиях, включая 19 статей в группе журналов *Science*, *Nature*, что свидетельствует о фундаментальном характере работ и позволило достичь нашей межрегиональной группе лидерских позиций в области исследования биогеохимических и климатических последствий деградации мерзлоты в контексте количественной оценки транспорта и трансформации терригенного вещества в море с речным стоком и в результате береговой эрозии и потоков основных парниковых газов в системе суша–шельф–атмосфера. Это дало возможность заложить фундаментальные научные основы климатического и экологического мониторинга акватории Северного морского пути, которые кратко изложены ниже.

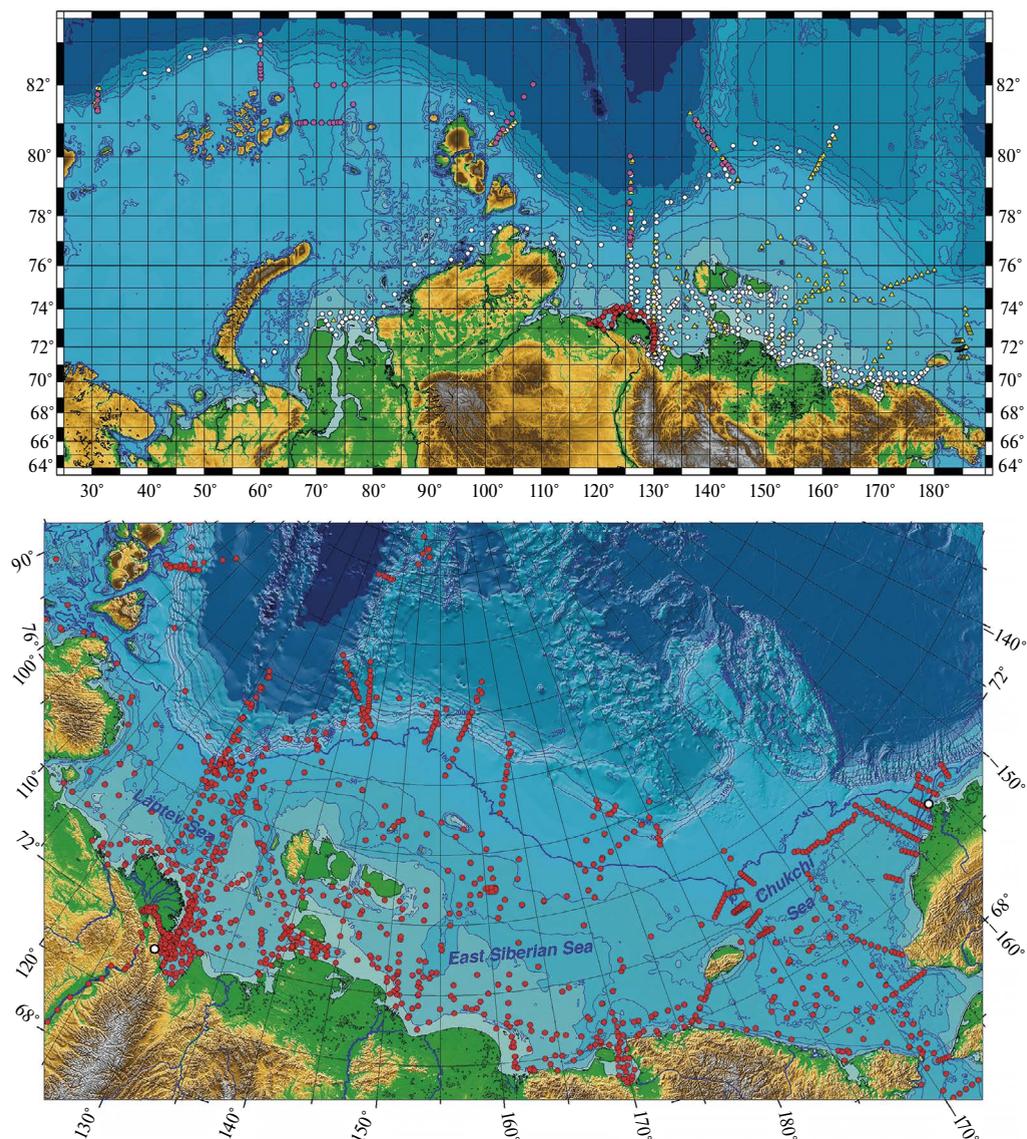


Рис. 4. Район исследований и положение океанографических станций в арктических морях России, выполненные в августе–сентябре 2003–2009 гг. (сверху), снизу – карта комплексных станций в МВА, где проводились исследования динамики компонентов углеродного цикла, включая  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , и их обмена с атмосферой (1996, 2010–2020 гг.).

## 1.2. Обмен двуокиси углерода как недоучтенный элемент баланса и круговорота углерода в российском секторе Арктики

### 1.2.1. Гетерогенность процессов на арктическом шельфе

Как известно, наиболее подвижное звено в круговороте углерода – обмен  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , которые являются продуктами аэробной ( $\text{CO}_2$ ) или анаэробной ( $\text{CH}_4$ ) деструкции органического углерода морского или наземного генезиса. Исходя из того, что примерно 89% выпавшего в осадок арктических морей России органического углерода минерализуется на дне [59, 60], можно прийти к выводу о том, что динамика карбонатной системы играет важную роль в балансе углерода опосредованно через потоки в системе дно–вода–атмосфера и изменение общего содержания неорганического углерода в водной толще. Как было показано ранее на примере субарктического Охотского моря, из осадков в воду после минерализации (в основном в форме бикарбонат-иона и растворенного  $\text{CO}_2$ ) возвращается примерно 1/3 достигшего дна органического углерода [63]. В арктических морях России, за исключением глубокой части Карского моря, наблюдается двухслойная структура водных масс, причем нижний слой, отделенный от поверхностных вод скачком плотности (пикноклином), сильно перенасыщен  $\text{CO}_2$  относительно концентраций равновесных с атмосферой – в результате минерализации ОУ в донных осадках и взвешенного ОУ в водной толще [64–69]. Это значит, что во время осенне-зимней конвекции происходит перемешивание МВА до глубин 45–60 м, что приводит к перенасыщению поверхностных вод по  $\text{CO}_2$  относительно атмосферы. В результате даже такое высокопродуктивное море, как Чукотское [64], может стать в годовом цикле нетто-источником  $\text{CO}_2$  в атмосферу [68]. К сожалению, все оценки баланса обмена  $\text{CO}_2$  в арктических морях выполняются только для летнего сезона, что позволяет рассматривать СЛО в качестве стока избыточного (антропогенного) атмосферного  $\text{CO}_2$ . Так, в работе Бейтса [69] оценки летнего поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$ , полученные для высокопродуктивного Чукотского моря, экстраполировались на всю акваторию СЛО, что привело к ложным выводам о роли СЛО как значимого стока антропогенного  $\text{CO}_2$ . Отметим, что в летний сезон также происходит вентиляция парниковых газов в атмосферу за счет сильных штормов во время минимального распространения плавучего льда, вызывающих перемешивание водной толщи до дна в мелководной сильностратифицированной части моря Лаптевых. Это приводит к эффективной вентиляции вод, сильно перенасыщенных растворенным  $\text{CH}_4$  [53].

Ниже будет показано, на основе многолетних высокопрецизионных измерений, что даже в летний период открытой от льда воды различные акватории морей Российской Арктики демонстрируют разнонаправленные потоки  $\text{CO}_2$ , что обусловлено динамическим изменением границ между гетеротрофными (перенасыщенными по  $\text{CO}_2$ ) и автотрофными (недонасыщенными по  $\text{CO}_2$ ) биогеохимическими провинциями, функционирование которых определяется сложным взаимодействием продукционно-деструкционных процессов, наложенных на биогеохимические эффекты, обусловленные характерными особенностями транспорта и трансформации эрозионного углерода и речных вод на мелководном шельфе МВА [70–74].

Известно, что биогенный фактор доминирует в изыпании растворенного  $\text{CO}_2$  в морях Арктики, примыкающих к Северной Атлантике (Баренцево, Гренландское) и Тихому океану (Чукотское), для которых характерна высокая продуктивность, обусловленная высокой прозрачностью вод и относительно высокими концентрациями биогенных элементов [59, 70–75]. Однако на обширном и мелководном шельфе Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых (рис. 4) мощный речной сток и латеральный поток углерода наземного происхождения определяет динамику карбонатной системы и цикла углерода в целом, так как относительно невысокая интенсивность продукционных процессов, обнаруженная в это же время года (сентябрь, максимум первичной продукции – 432 мг-С/м<sup>3</sup>/день и биомассы мезозоопланктона – 890 мг/м<sup>2</sup>) [76], не проявляется в явном виде в изыпании растворенного  $\text{CO}_2$ , утилизируемого при фотосинтезе. Более того, воды МВА летом и зимой характеризуются высокими значениями  $p\text{CO}_2$  и являются источником поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу [65, 66, 71]. Основным фактором, лимитирующим фотосинтез в МВА,

представляется низкая прозрачность воды, которая определяется высоким содержанием гуминовых кислот (интегральные величины CDOM, Colored Dissolved Organic Matter, измеряются с помощью оптических датчиков [74, 77]) и взвешенного терригенного вещества [65–68].

Гетерогенность процессов на арктическом шельфе и в прилегающей части суши [59, 60] приводит к высокой изменчивости величин потоков  $\text{CO}_2$  во времени и пространстве [71–76]. Более того, направление результирующего потока углерода через поверхность раздела воздух–вода (лед) непостоянно во времени и пространстве. Поэтому распространенное допущение о квазипостоянстве среднегодового потока  $\text{CO}_2$  в океан приводит к большим ошибкам и неопределенностям в расчете элементов потока и баланса масс углерода в системе атмосфера–суша–шельф в Арктике.

### 1.2.2. Моря Восточной Арктики как сток атмосферного $\text{CO}_2$

Начиная с 1996 г. исследовалась пространственно-временная динамика элементов карбонатной системы в Чукотском море и обмена  $\text{CO}_2$  в системе атмосфера–океан [64]. Было показано, что акватория Чукотского моря является одним из самых значимых в масштабах СЛО регионов стока атмосферного  $\text{CO}_2$ ; только за сентябрь в среднем поглощается  $\sim 2$  Тг С- $\text{CO}_2$ , что количественно согласуется с оценками С. Калтина и Л. Андерсона [78]. Можно предположить, что за время безледного периода (не менее 2 месяцев) только Чукотское море поглощает около 4–5 Тг С- $\text{CO}_2$ , что в какой-то мере компенсирует эвaziю  $\text{CO}_2$  из прибрежной зоны МВА и Карского моря. Тем не менее вопрос о результирующем направлении потока в системе атмосфера–океан в морях Российской Арктики и Северного Ледовитого океана в целом остается открытым. Далее рассмотрим кратко роль морского льда в региональном балансе  $\text{CO}_2$ .

До недавнего времени существовало мнение о том, что морской лед является непроницаемым барьером для переноса  $\text{CO}_2$  и других газов. Однако на основе экспериментальных исследований Госинка и Келли [79] было сделано предположение о том, что морской лед может играть значимую роль в региональном балансе  $\text{CO}_2$  (сток летом и источник зимой). Наши экспериментальные работы, выполненные на льду Чукотского моря ( $\sim 72^\circ$  с. ш., около мыса Барроу) на основе использования прямых методов измерения потока микрометеорологическим и камерно-динамическим методом, показали, что по крайней мере в летний сезон морской лед проницаем и подледная вода является значимым стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$  [68]. Величина турбулентного потока  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) была направлена вниз и изменялась в пределах (0,01–0,02 мг  $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{c}$ ), что близко к величинам потоков, измеренным в северной части примыкающей тундры. Прямыми измерениями  $\text{pCO}_2$  в ледовых рассолах и в подледной воде выявлены низкие значения, не более 130–150 натм. Камерно-динамические измерения показали резкое уменьшение равновесной концентрации  $\text{CO}_2$  над углубляющимися снежницами, особенно в последние дни наблюдений, когда среднесуточная температура воздуха выросла до  $0^\circ\text{C}$  и глубина снежниц увеличилась до 20 см. Эти результаты согласуются с увеличением интенсивности проникающей солнечной радиации в снежницах и подо льдом. В масштабе СЛО летом через снежницы возможно поглощение до 40 Тг С- $\text{CO}_2$  ( $1 \text{ Тг} = 10^{12} \text{ г С-}\text{CO}_2$ ). Это поглощение может быть в какой-то мере скомпенсировано зимним потоком в атмосферу через лед, возможность которого была показана на ограниченном количестве данных [80].

Зимние подледные измерения  $\text{pCO}_2$  *in situ* показали резкое понижение значений  $\text{pCO}_2$  с началом полярного рассвета, что дает основание предположить начало раннего фотосинтеза подо льдом [72]. Эта гипотеза согласуется с перенасыщением подледной воды растворенным кислородом, обнаруженным подо льдом моря Лаптевых в конце февраля–начале марта (неопубликованные данные Тиксинского управления по гидрометеорологии), а также подледным перенасыщением воды растворенным кислородом в Амурском заливе Японского моря [81], где ранее было обнаружено подледное цветение диатомовых водорослей. При полном подтверждении этой гипотезы роль СЛО как стока  $\text{CO}_2$  из атмосферы должна быть пересмотрена.

### 1.2.3. Моря Восточной Арктики как источник атмосферного $\text{CO}_2$

Обнаружение аномально высоких значений  $\text{pCO}_2$  в мелководных районах моря Лаптевых стало основой для создания нового направления исследований биогеохимических последствий деградации берегового ледового комплекса (рис. 5), обогащенного древним ОВ [28, 29, 67]. Согласно многолетним данным (1994–2020 гг.), наиболее высокие значения  $\text{pCO}_2$  в МВА обнаруживаются вблизи сильно эродирующих побережий, сложенных ледовым комплексом [16, 28, 29, 67], что хорошо иллюстрируется на рис. 6, из которого видно, что сопряженные аномалии  $\text{pCO}_2$ , степени насыщения кислородом и суммы нитриты–нитраты наблюдаются в прибрежной зоне, где скорости эрозии берегов максимальны [16].

Мы полагаем, что древнее ОВ, захороненное в мерзлоте, биоактивно и способно быстро вовлекаться в современный биогеохимический цикл, в отличие отрастворенного ОВ, которое окисляется намного медленнее [82]. Подтверждением этому служат данные, полученные на осушке у быстро эродирующего ледового комплекса в прол. Дмитрия Лаптева [76]. Камерно-динамические измерения потоков  $\text{CO}_2$  на пляже и в море показали высокие скорости окисления древнего ОУ до  $\text{CO}_2$  на суше и в море. Суммарный летний поток  $\text{CO}_2$ , обусловленный окислением эрозионного ОУ, превысил 20 млн т в год [83], что более чем в 3 раза вышеразпространенных оценок экспорта эрозионного ОУ на шельф МВА [59]. Это принципиально изменило понимание биогеохимической и климатической роли последствий береговой эрозии, которая оказалась во много раз более значимая, чем вынос взвешенного ОУ и растворенного  $\text{CO}_2$  со стоком р. Лена [84]. В работе [73] было показано, что именно окисление эрозионного ОУ до  $\text{CO}_2$  является основной причиной экстремальной асидификации (подкисления) вод западной гетеротрофной провинции МВА, где экологические и биогеохимические особенности определяются низкой продуктивностью вод и перенасыщением вод по  $\text{CO}_2$  относительно атмосферы.



Рис. 5. Ледовый комплекс о-ва Муостах, Северный мыс, август 2004 г. (фото И.П. Семилетова).

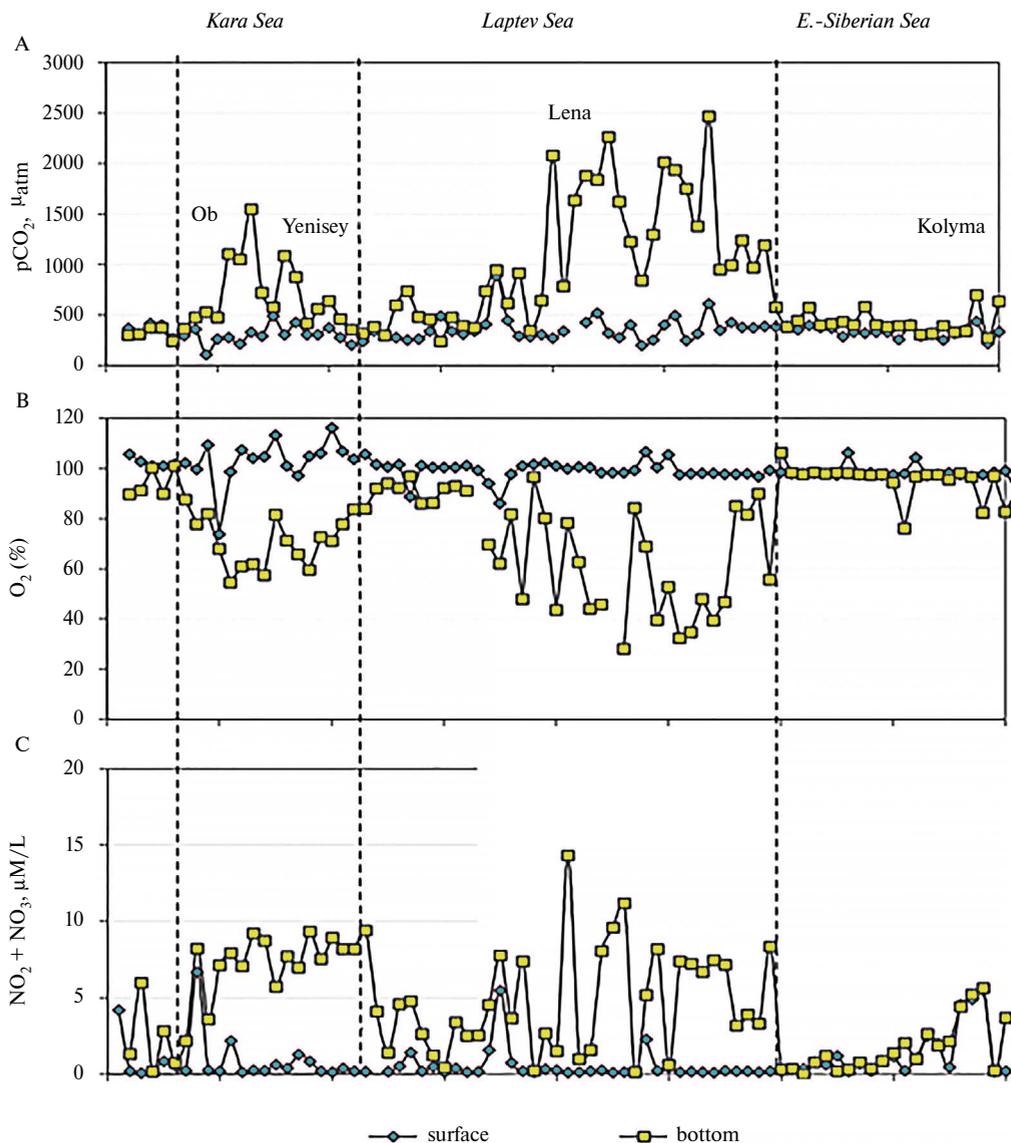


Рис. 6. Распределение величин  $p\text{CO}_2$  (A), степени насыщения растворенным  $\text{O}_2$  (B), суммы нитриты–нитраты (C) в морях Российской Арктики по Северному морскому пути (по маршруту движения в трансарктической экспедиции на борту ГС «Николай Коломейцев» в сентябре 2000 г.).

Молекулярный анализ органической фракции донных отложений показал, что на акватории Северного морского пути при движении с запада на восток возрастал (от 32 до 42%) вклад фурфуролов (furfurals), которые характеризуют *свежесть* (freshness) – малую степень декомпозиции ОВ [85]. В то же время по направлению с запада (приустьевая зона Оби и Енисея) на восток (устье Индигирки) относительный вклад нитрилов (nitriles) снижался, что в сочетании с увеличением относительного вклада фурфуролов (от 32 до 42%), свидетельствуют о том, что в Восточной Арктике древнее ОВ способно к дальнейшей деструкции в большей степени, чем в Западной Арктике (бассейн Карского моря). Другими геохимическими индикаторами, подтверждающими правильность нашей гипотезы о важной роли разрушения берегов арктических морей в биогеохимии арктических морей, являются: определяющий вклад наземного органического вещества (CTOM – contribution of terrestrial organic matter) в формировании донных осадков (до 100% в прол. Дмитрия Лаптева) и «тер-

ригенное» C/N отношение в составе органического вещества в донных отложениях [16, 67, 84, 86]. Аномально высокие значения  $p\text{CO}_2$  и биогенных элементов в прибрежных водах вблизи быстро эродирующих береговых ледовых комплексов и в придонных водах в районах аккумуляции наземного органического вещества также свидетельствуют об определяющей роли эрозионного ОУ в биогеохимии исследуемого района [76]. Так, на рис. 6 можно увидеть, что аномально высокие значения  $p\text{CO}_2$  могут достигать 2500, а на некоторых станциях 3000–4000  $\mu\text{атм}$  от поверхности до дна [67], что намного выше известных аномалий, когда-либо обнаруженных в Мировом океане.

Как было показано выше, основным источником  $\text{CO}_2$  эрозионного генезиса в МВА являются породы ледового комплекса (рис. 5), обогащенные ОВ, и широко распространенные в Якутии. На севере Якутии протяженность морских берегов с такими породами составляет около 2000 км [59, 83], поэтому процесс разрушения ледового комплекса, содержащего огромные запасы иммобилизованного ОВ, и его окисление до  $\text{CO}_2$  играет важную роль в региональном цикле углерода и экстремальной асидификации вод МВА – важнейшего экологического параметра на акватории СМП.

Карта потоков  $\text{CO}_2$  показывает мозаичную картину пространственного распределения, хотя значения эвазии  $\text{CO}_2$  в 2004 г. существенно превосходят соответствующие величины в 2003 г., что объясняется более высокими значениями  $\Delta p\text{CO}_2$  и скорости ветра в 2004 г. [66, 87]. Средние значения потока  $\text{CO}_2$  в 2004 г. составили 10,4  $\text{мм}^3/\text{м}^2/\text{день}$  и были на порядок выше, чем в 2003 г. (1,0  $\text{мм}^3/\text{м}^2/\text{день}$ ). Если предположить, что мелководный шельф МВА и Карского моря (площадь  $\sim 3$  млн  $\text{км}^2$ ) в течение 50 сут (безледный период) является источником  $\text{CO}_2$  в атмосферу (эвазия  $\text{CO}_2 = 1$   $\text{мм}^3/\text{м}^2/\text{день}$ ), то минимальная оценка летней эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу составит  $\sim 4,2$  Тг С- $\text{CO}_2$ , а максимальная оценка  $\sim 42$  Тг С- $\text{CO}_2$ , что соизмеримо с оценкой летнего поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$  через снежицы всего СЛО [68].

Согласно результатам исследований, выполненных в 2008 г. в сотрудничестве с Гетеборгским университетом, предполагается, что летне-осенняя эмиссия  $\text{CO}_2$  в атмосферу из МВА (без учета Чукотского моря) составляет примерно 10 Тг С- $\text{CO}_2$  [88, 89], что по порядку величин близко к количеству всего ОУ, которое ежегодно захороняется в морях Российской Арктики [59] и составляет примерно 1/3 от величины, характеризующей увеличение поступления в донные отложения АМР по сравнению с величиной, осредненной для голоцена.

Из вышеизложенного следует, что центральная часть СЛО, скорее всего, является нетто-стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$  [65, 69, 72, 75]. Однако вопрос о роли арктического шельфа в общем балансе  $\text{CO}_2$  остается открытым. Основные неопределенности связаны с увеличением роли эмитента  $\text{CO}_2$  в атмосферу – гетеротрофной провинции МВА, граница которой сдвигается на восток [70–73]. Фундаментальным вопросом остается недооценка роли вентиляции придонных (на мелком шельфе) и глубинных, насыщенных  $\text{CO}_2$  вод во время сильных штормов и осенне-зимней конвекции [68, 83–90]. По аналогии с документированной эмиссией метана в атмосферу вследствие вентиляции вод, обусловленной сильными штормами [53], можно прийти к предварительному выводу о том, что абсорбционная роль СЛО в контексте поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$ , выполненного на основе крайне ограниченных данных, сильно завышена, и должна быть пересмотрена по мере накопления новых данных.

### **1.3. Обмен метана как недоучтенный элемент баланса и круговорота углерода в российском секторе Арктики**

#### **1.3.1. Климатические изменения на шельфе МВА**

До недавнего времени предполагалось, что в формировании арктического максимума  $\text{CH}_4$  участвуют исключительно наземные северные экосистемы [27–30, 37], в то время как вклад арктических морских экосистем оценивался как незначительный. В то же время известно, что шельф МВА характеризуется уникальными литологическими и седиментологическими условиями, создающими благоприятные условия для продукции и накопления

$\text{CH}_4$  в донных отложениях [18, 19]. С другой стороны, являясь исключительно мелководным, шельф МВА в холодные климатические эпохи обнажается и становится частью наземных северных экосистем [17, 20, 21, 48, 49]. В результате глубокого промерзания на шельфе–суше формируются многолетние мерзлые толщи (мерзлота), которые не только препятствуют восходящему движению  $\text{CH}_4$  из донных отложений, но и ограничивают современную продукцию  $\text{CH}_4$  областями преимущественного накопления осадков (так называемые депо-центры), а также областями формирования таликов в структуре мерзлоты. При последующей смене холодных климатических периодов на теплые и росте уровня океана происходит обратное затопление обнаженной части МВА, вызывающее изменение термического режима мерзлоты и ее постепенную деградацию [17]. При этом термический режим погруженной мерзлоты, которая становится подводной, изменяется гораздо более существенно по сравнению с наземной мерзлотой, поскольку среднегодовая температура морской воды теплее температуры воздуха холодных эпох более чем на 15–17 °С, в то время как разница температуры холодных и теплых эпох составляет 7–8 °С [1–6]. Согласно палеоклиматическим данным [14, 24, 27, 36], в результате роста температуры эмиссия  $\text{CH}_4$  и, соответственно, атмосферные концентрации увеличиваются от 0,3–0,4 ppm (холодные эпохи) до 0,6–0,7 ppm (теплые эпохи). В последние 150 лет наблюдается резкий рост эмиссии метана, который привел к беспрецедентному увеличению атмосферных концентраций  $\text{CH}_4$  в целом на планете до 1,7 ppm, а в атмосфере Арктического региона – до 1,85 ppm. К настоящему времени концентрация атмосферного  $\text{CH}_4$  в районах Арктики приближается в летний сезон к 2,00 ppm, а на экватории МВА достигает в районах массивной разгрузки  $\text{CH}_4$  от 3 ppm [53] до 7–16 ppm [17, 20, 31, 32]. При этом в Арктическом регионе наблюдается потепление климата, которое проявляется в росте среднегодовых температур воздуха и воды, сокращении морского и пресного льда, уменьшении толщины снега, таянии ледников, изменении температурного режима наземной мерзлоты [8]. Очевидно, что потепление оказывает влияние и на состояние подводной мерзлоты, которая и без того претерпевает более значительные климатические изменения термического режима по сравнению с наземной мерзлотой. Согласно данным бурения, в прибрежных районах моря Лаптевых средняя температура верхнего 70 м слоя подводной мерзлоты близка к –1 °С, что уже привело к формированию структуры по типу мерзло-талого сэндвича (которая определяется степенью минерализации поровой воды), в то время как бурение на суше показало, что температура аналогичного слоя мерзлоты близка к –11 °С [18, 19, 57]. В этой связи изучение шельфа МВА как источника поступления  $\text{CH}_4$  в атмосферу Арктического региона является чрезвычайно актуальным.

### 1.3.2. Метан в водной толще

На основании полученных данных показано, что по результатам измерений 2003–2006 гг. как придонные, так и поверхностные пробы воды были значительно перенасыщены  $\text{CH}_4$ , более 50% изученной акватории являлось источником  $\text{CH}_4$  в атмосфере региона (рис. 7). Пространственное распределение концентраций отличалось выраженной мозаичностью и наличием резких пространственных градиентов. Выделялись локализованные области, в которых перенасыщение воды растворенным  $\text{CH}_4$  достигало 900–18 000% [31]. Такие области составляли около 10% изученной акватории и были определены как области разгрузки  $\text{CH}_4$  в атмосферу.

Ниже рассмотрены особенности вертикального распределения  $\text{CH}_4$  в водном столбе [20]. Выделено три типа распределения  $\text{CH}_4$  в водном столбе, характерные как для летнего, так и для зимнего периода: первый тип – распределение с наличием придонного максимума растворенного  $\text{CH}_4$ ; второй тип – распределение с наличием поверхностного максимума, третий тип – распределение с отсутствием градиента концентрации в пределах водного столба (рис. 8).

Показано, что перенос метана в водном столбе осуществляется двумя способами – диффузионным и пузырьковым. В пользу диффузионного переноса свидетельствует первый тип распределения растворенного  $\text{CH}_4$  в водном столбе, в пользу пузырькового переноса – второй и третий типы. В пользу пузырькового переноса также свидетельствуют большие скопления пузырей, выявленные с помощью геофизических методов в донных отложениях,

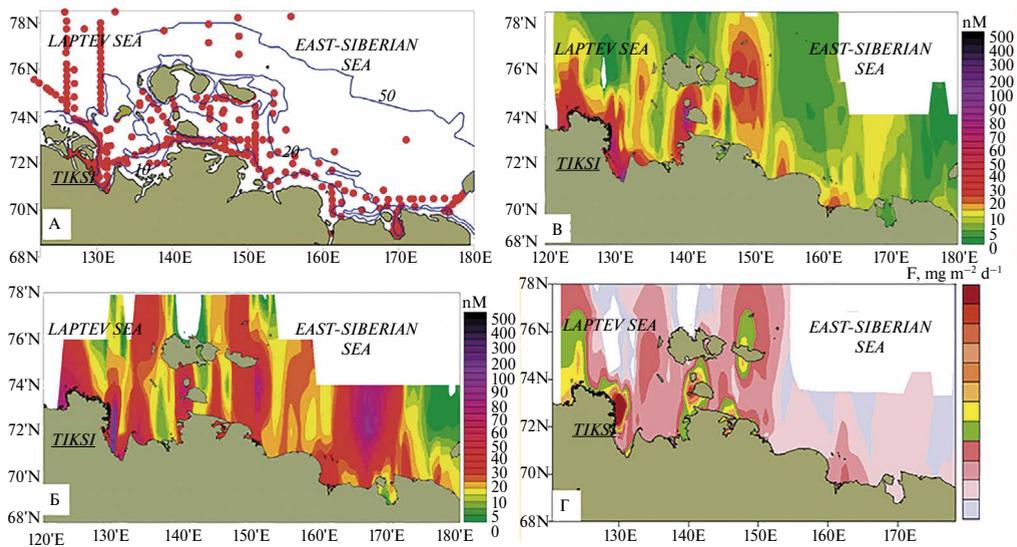


Рис. 7. Положение океанографических станций в районе исследования (А); распределение концентраций растворенного  $\text{CH}_4$  в придонном слое воды (Б); распределение концентраций растворенного  $\text{CH}_4$  в поверхностном слое воды (В); диффузионные потоки  $\text{CH}_4$  (Г).

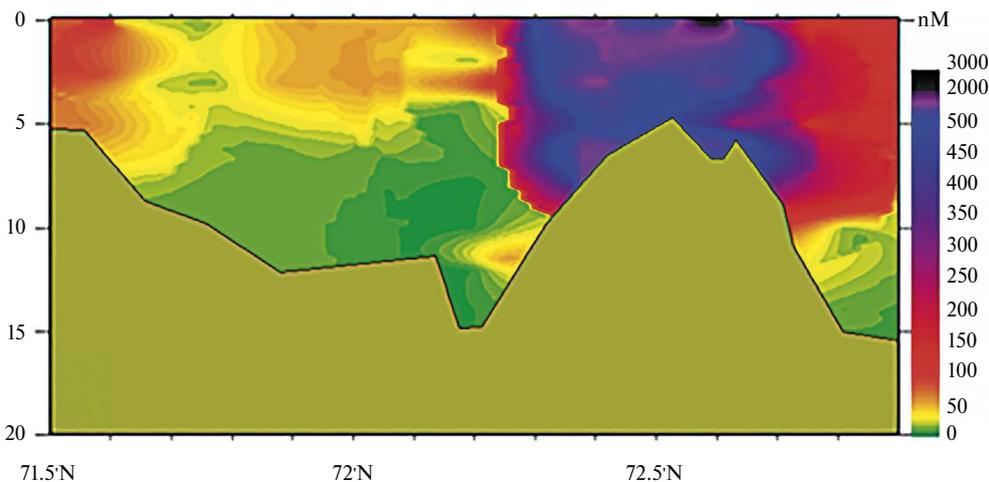


Рис. 8. Вертикальный разрез, совмещающий профили второго и третьего типов распределения  $\text{CH}_4$  в водном столбе. Пробы отобраны подо льдом в апреле 2007 г.

с помощью гидроакустических методов – в толще воды (рис. 9) и визуально обнаруженные в составе морского льда зимой (рис. 10).

Для оценки межгодовой изменчивости был разработан и реализован количественный метод интегральной оценки запаса растворенного метана в водном столбе и потенциальной эмиссии [52, 91]. Показано, что межгодовая изменчивость интегрального запаса растворенного метана может достигать  $>5$  раз, в то время как средние концентрации растворенного метана в поверхностных водах изменялись только на 30%. Анализ сезонных различий интегрального запаса метана выполнен для зал. Буор-Хая на основе летних данных 2005 г. и зимних данных 2007 г. Выявлено, что концентрации растворенного метана в летнее время в этом районе изменялись в придонном слое пределах от 2,1 до 651 nM, а в поверхностном

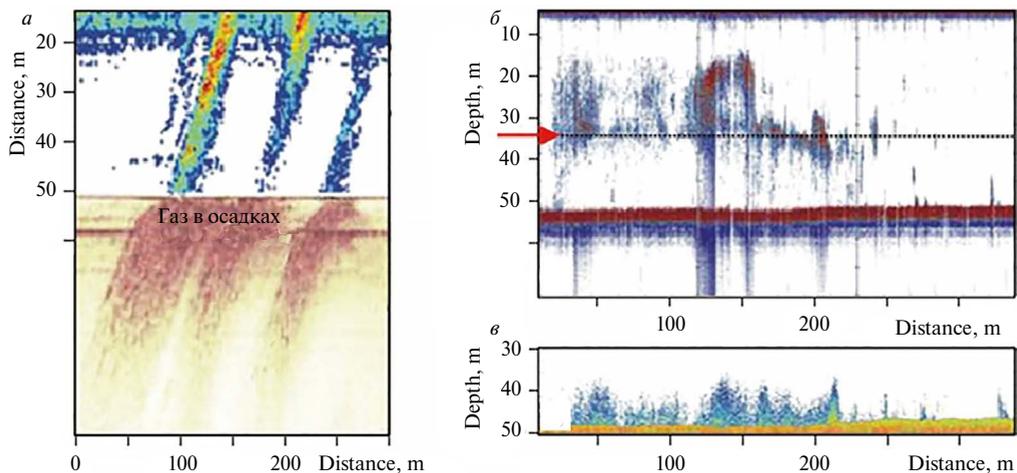


Рис. 9. Результаты обработки первых сейсмических и гидроакустических данных (модифицировано из [31]): а – пузыри в составе осадков и в толще воды; б – скопления пузырей в водной толще, по данным судового эхолота; в – пузыри, выходящие из дна, по данным лоатора бокового обзора.

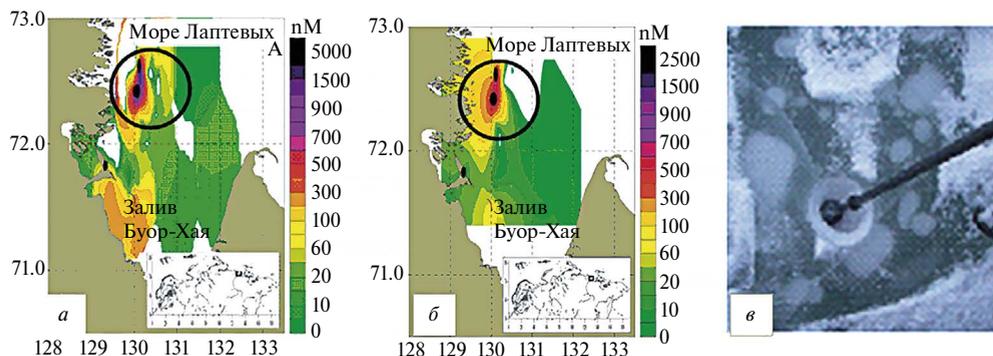


Рис. 10. Распределение концентраций растворенного метана в водном столбе в районе Бур-Хая, измеренное подо льдом в апреле 2007 г.: а – поверхностный слой воды; б – придонный слой воды; в – пузыри, включенные в состав льда (модифицировано из [20, 31]).

слое – от 2,9 до 298 nM (в сентябре 2009 г. – до 370 nM). В зимнее время самые высокие концентрации растворенного метана, измеренные подо льдом в поверхностном слое воды, достигали 5000 nM, а в придонном слое – 2500 nM. Таким образом, сезонная изменчивость концентраций достигала 8–10 раз [20, 31]. При этом в составе морского льда были зарегистрированы пузыри диаметром до 30 см (рис. 10). Расчет интегральных запасов метана в водном столбе изучаемого района (принятой площадью  $10^3 \text{ км}^2$ ) показал, что в летнее время он составил  $7,6 \times 10^7 \text{ г CH}_4$ , в то время как в зимнее время увеличился почти на порядок и достиг  $60,1 \times 10^7 \text{ г CH}_4$  [52, 91].

### 1.3.3. Метан в придонном слое атмосферы

Данные о содержании метана в придонном слое атмосферы по результатам летней экспедиции 2005 г. и вертолетной съемки 2006 г. также свидетельствует о важности эмиссии  $\text{CH}_4$  из шельфа МВА [20, 31]. На основе данных 2005 г. показано, что концентрации метана в придонном слое атмосферы по маршруту движения судна на высоте 3 м от поверхности резко возросли при выходе из Карского моря в море Лаптевых (рис. 11).

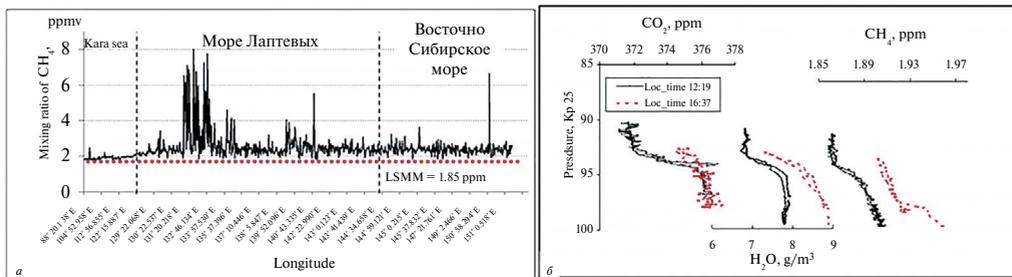


Рис. 11. Динамика концентраций метана в приземном слое атмосферы: *a* – при движении судна по маршруту Северного морского пути (2005 г.); *b* – во время вертолетной съемки до высоты 1800 м от поверхности моря (2006 г.).

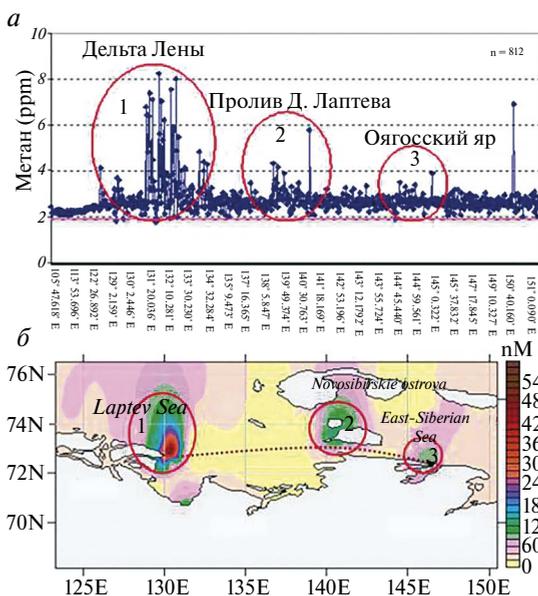


Рис. 12. Концентрации метана в приземном слое атмосферы (*a*) вдоль разреза, показанного в части *b* рисунка в виде пунктирной линии красного цвета; на панели (*b*) представлены концентрации метана в поверхностном слое воды (сентябрь 2005 г.).

Средняя концентрация атмосферного метана в Карском море составляла  $2,1 \pm 0,02$  ppm, в море Лаптевых среднее значение возросло до  $2,97 \pm 0,15$  ppm, а в Восточно-Сибирском море составило  $2,66 \pm 0,09$  ppm. Резкие всплески концентраций достигали в море Лаптевых 8,2 ppm, а в Восточно-Сибирском море – 6,4 ppm [20, 52]. Данные, полученные в результате вертолетной съемки, зарегистрировали увеличение атмосферных концентраций метана до высоты 1800 м; это увеличение достигало 5–10% от величины средней концентрации для данных широт (1,85 ppm). На основе летних измерений 2005 г. было показано, что области повышенных концентраций атмосферного метана коррелируют с областями плюмов растворенного метана [20] (рис. 12).

### 1.3.4. Источники и стоки метана в морях Восточной Арктики

Как было показано выше, высокая несбалансированность цикла углерода в морях Российской Арктики является одной из наиболее ярких особенностей полярного литогенеза и состава захороняющегося ОВ. Согласно оценкам, приведенным в [59], размеры анаэробных

диагенетических потерь ОВ (восстановление идет в микрizonaх скопления ОВ) составляют 5–7%, часть из которого может поступать в воду–атмосферу в форме  $\text{CH}_4$ . Это значит, что при условии трансформации 7% от всего количества ежегодно осажденного ОВ, которое оценивается в 9 млн т С, в воду всех морей Российской Арктики в результате диагенеза может попасть не более чем 0,63 млн т метана, из которых примерно половина приходится на МВА. Здесь важно отметить, что до 70–100% ОВ поверхностных осадков Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых являются наземными по происхождению [16, 84, 86]. Учитывая, что только малая доля (~1%) осажденного терригенного ОВ служит субстратом для метаногенеза, становится очевидным, что потенциальный вклад современных донных отложений морей Российской Арктики в современный цикл метана практически незначим по сравнению с наблюдаемыми потоками: только диффузионный поток метана из водной толщи морей Восточной Арктики в атмосферу оценивается в 5–6 млн т  $\text{C-CH}_4$  [20, 31].

До последнего времени было распространено мнение о том, что одним из важнейших источников  $\text{CH}_4$  на арктическом сибирском шельфе могут быть сибирские реки, которые интегрируют особенности углеродного цикла в их водосборах. В частности, это проявляется в увеличении концентрации растворенного  $\text{CH}_4$  в устьевых районах [20, 52, 92]. Для выявления значимости стока рек в баланс прибрежной зоны МВА нами были рассчитаны интегральные величины запаса растворенного метана, солёности и общего минерального углерода в водном столбе, которые показали высокую положительную корреляцию между собой, свидетельствуя о том, что речные воды не играют значимой роли в динамике растворенного  $\text{CH}_4$  на акватории МВА. Тем не менее для уточнения роли латерального переноса метана речным стоком в сентябре 2006 г. была выполнена специализированная экспедиция, в задачу которой входило проследить, как изменяются концентрации растворенного метана вниз по течению р. Лена до выхода речных вод на шельф. В результате исследования было показано, что концентрации растворенного метана снижаются вниз по течению до фоновых значений в зоне смешения речных и морских вод [16, 20, 76, 84], что связано с высокими скоростями микробиологического окисления  $\text{CH}_4$  в пресноводных экосистемах (рис. 13).

Анаэробная продукция метана в водном столбе МВА маловероятна по целому ряду причин [20]. Во-первых, в изученных районах МВА водная толща является аэробной средой (насыщение  $\text{O}_2 \geq 40\%$ ), поэтому продукция метана может иметь место только в анаэробных линзах, существование которых предполагается на нижней границе пикноклина в морях с нормально высокой первичной продукцией (типичные морские экосистемы). Во-вторых, в изученном гетеротрофном районе первичная продукция резко ограничена недостатком света (светопрозрачность в некоторых районах составляет не более 40 см) и в среднем на 1–2 порядка ниже, чем в типичных морских экосистемах [71, 76]. В-третьих, глубина пикноклина в морях, где обнаруживается феномен анаэробной продукции, обычно составляет 100–150 м. Это позволяет достаточному количеству ОВ аккумулироваться для поддержания

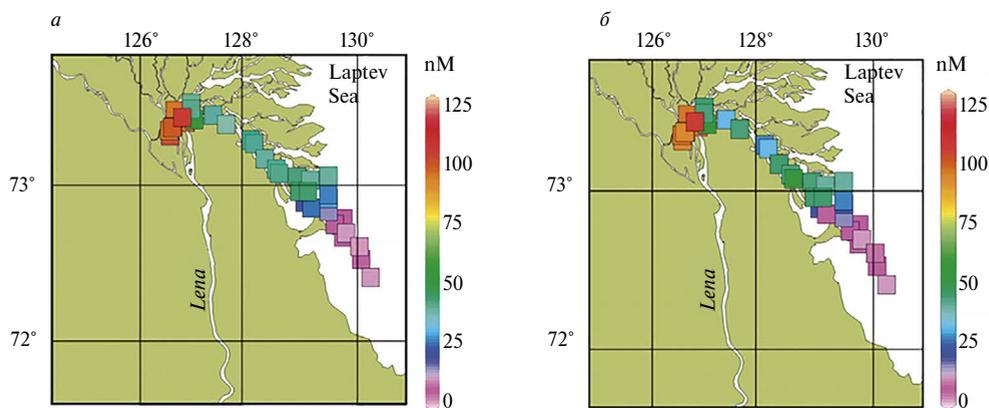


Рис. 13. Динамика растворенного метана вниз по течению р. Лена в Быковской протоке (сентябрь 2006 г.): *a* – придонные концентрации; *b* – поверхностные концентрации.

метаногенеза. В МВА глубина пикноклина изменяется от 0,5 м до 20 м, а на значительной площади МВА после штормов стратификация вообще отсутствует. Это означает, что в условиях МВА создание подходящих условий и накопление достаточного субстрата для продукции в водном столбе маловероятно. Исключение может составлять высокопродуктивное Берингово море, в его глубокой части с глубоко залегающим пикноклином, что требует специального исследования.

Аэробная продукция метана в водном столбе МВА в данной работе не обсуждается, так как до сих пор у микробиологов не сложилось единой точки зрения о самой возможности этого процесса [92, 93]. В любом случае величины концентраций растворенного  $\text{CH}_4$ , которые могут ассоциироваться с продукцией  $\text{CH}_4$  в аэробных условиях СЛО, не превышают 6 нМ. Из этого следует, что данный фактор (при допущении, что он присутствует) пренебрежимо мал при рассмотрении миграции метана в МВА, где концентрации растворенного  $\text{CH}_4$  достигают 970 нМ – летом (2008 г.) и 5000 нМ – зимой (2007 г.). Первые прямые измерения скорости микробного окисления в водной толще МВА оказались невелики, что проявляется в распротранении халоклиновых вод МВА, перенасыщенных по растворенному  $\text{CH}_4$ , в сторону Северного полюса и в восточную часть Чукотского моря [56].

Особенности пространственного и вертикального распределения растворенного  $\text{CH}_4$ , а также сезонная динамика не могут быть объяснены современной продукцией  $\text{CH}_4$  в донных осадках МВА, поскольку территориальное распределение растворенного метана в придонном слое воды в изучаемом районе отличалось высокой степенью мозаичности и не коррелировало с распределением концентраций органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ) в донных осадках [56]. Например, в прол. Дмитрия Лаптева, где концентрация  $\text{C}_{\text{орг}}$  минимальна и составляет обычно <0,5%, на протяжении многих лет была зарегистрирована устойчивая аномалия растворенного метана (до 154 нМ), равномерно распределенного в водном столбе. Отметим, что в работе Арэ [94] описаны многочисленные случаи, когда в ходе выполнения работ на российском арктическом шельфе неоднократно наблюдались прорывы газовых струй из дна в воду–воздух. Описан случай, когда при поведении взрывных работ для навигационных целей в прол. Дмитрия Лаптева воздух над льдом загорелся синим пламенем [95], что может свидетельствовать о выбросе природного метана (возможно, гидратов) из донных залежей. Результаты многолетнего мониторинга районов массивированных выбросов пузырькового  $\text{CH}_4$  и кернов донных осадков свидетельствуют о том, что в МВА струи  $\text{CH}_4$  поступают из глубинных источников через газопроводящие каналы, минуя слой сульфатредукции [54–56], который является биогеохимическим фильтром, препятствующим поступлению биогенного  $\text{CH}_4$ , образованного в процессе диагенетических преобразований в осадках Мирового океана [96].

Уникальность МВА заключается в том, что это самый мелководный и широкий шельф Мирового океана, где накоплены гигантские запасы гидратов, дестабилизация которых приводит к массивированной пузырьковой разгрузке из донных отложений в водную толщу–атмосферу. В отличие от глубокого океана значительная часть пузырькового метана достигает атмосферы, что приводит к формированию повышенных концентраций атмосферного метана. Поэтому МВА, где находятся более 80% подводной мерзлоты и гигантские запасы гидратов, рассматривается как единственный регион Мирового океана, который может играть важную климатическую роль [18, 19, 38–40].

Сравнение результатов летних и зимних исследований, выполненных в северо-западной части губы Буор-Хая, море Лаптевых, показали зимнее увеличение концентраций (с максимумом подо льдом) по сравнению с летним на порядок от  $10^2$  до  $10^3$  нМ, что свидетельствует о наличии мощного донного источника [53]. В сентябре 2009 г. в этом районе с помощью многолучевого эхолота (совместная работа с Университетом Калифорния, Санта Барбара) были обнаружены сотни сипов, многие из которых поставляли шлейф пузырей непосредственно в атмосферу, что проявилось в увеличении концентраций атмосферного  $\text{CH}_4$  примерно на 25% выше фоновых при аномалиях растворенного метана до 800 нМ [53]. Этот факт, наряду с результатами, приведенными в разделах 1.3.1–1.3.3 настоящей работы, однозначно свидетельствует о важной роли пузырькового переноса  $\text{CH}_4$  через донные осадки и водную толщу в атмосферу, который является основным механизмом вертикального транспорта, позволяющим избежать микробного окисления [54].

В соответствии с данными моделирования современного состояния подводной мерзлоты в прол. Дмитрия Лаптева [97] устойчиво обнаружение аномально высоких концентраций растворенного  $\text{CH}_4$  в водном столбе прол. Дмитрия Лаптева, в частности на тех станциях, которые были выполнены в наибольшей близости к юго-восточному побережью о-ва Большой Ляховский. Именно там, согласно [18], был обнаружен керн, полностью состоящий из немерзлых охлажденных пород, что свидетельствует о возможности формирования сквозного талика. Этот и другие примеры, включая обнаружение тектоногенного талика, заверенного электромагнитным профилированием и авторским бурением с припайного льда в губе Буор-Хая [57], указывают на пространственную корреляцию ряда аномалий растворенного  $\text{CH}_4$  с положением рифтовых зон, где геотермический поток может достигать значений  $100 \text{ мВт/м}^2$  и выше, что обеспечивает деградацию подводной мерзлоты также снизу вверх [48, 49].

На первом этапе идентификации возможных источников метана совместно с Университетом Утрехт был выполнен изотопный анализ углерода ( $\delta\text{C}_{13}$ ) и водорода ( $\delta\text{D}$ ) метана [98]. Кроме того, совместно с Музеем естественных наук при Стокгольмском университете был выполнен изотопный анализ благородных газов ( $\text{He}_{3/4}$ ) с целью подтверждения гипотезы о возможности поступления в водную толщу МВА мантийных газов. Данные убедительно показали, что изотопная формула метана в изученном районе наилучшим образом характеризует смесь различных источников, в числе которых могут быть как биогенные, так и термогенные (рис. 14). Диапазон изменчивости  $\delta\text{C}_{13}$  составил  $(-0,9):(-68,3) \text{ ‰}$ , в то время как для  $\delta\text{D}$  он составил  $(-196,1):(-47,5) \text{ ‰}$ . Характерная особенность распределения изотопных характеристик в водном столбе состояла в отсутствии тенденции к утяжелению

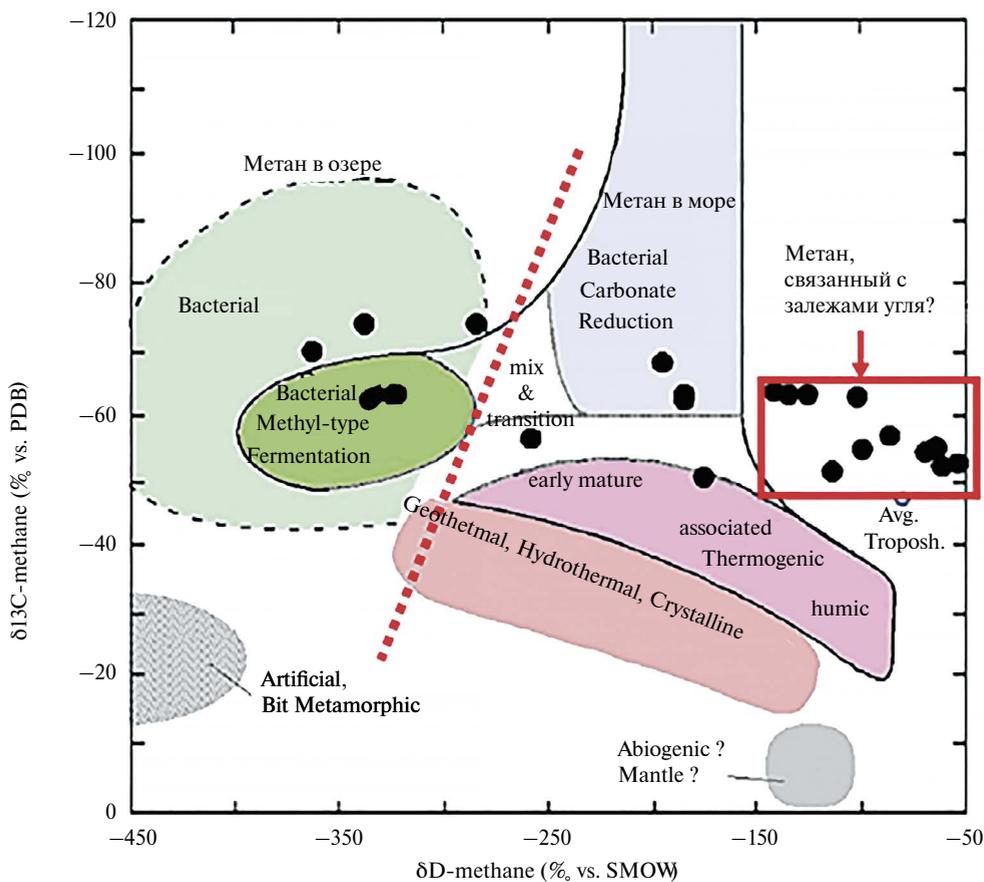


Рис. 14. Диаграмма, характеризующая взаимосвязь  $\delta\text{C}_{13}$  и  $\delta\text{D}$  в изотопной формуле метана в МВА.

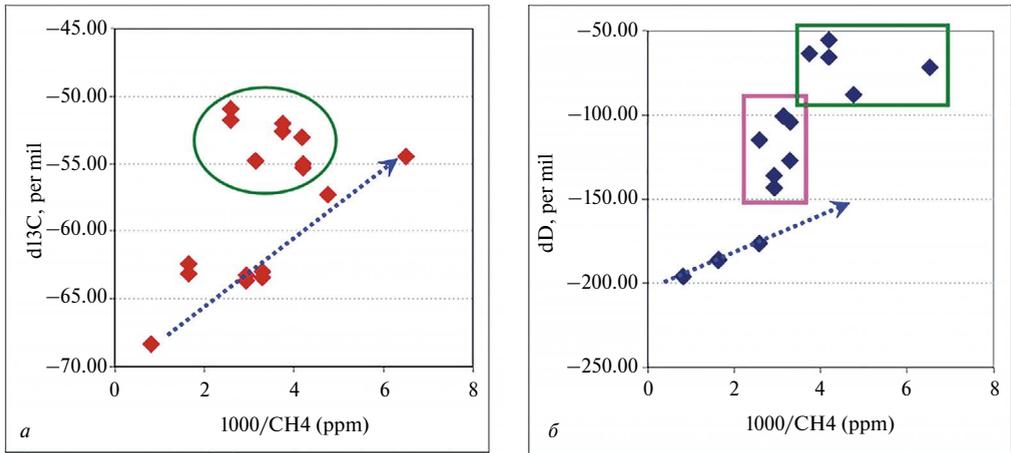


Рис. 15. Изотопная формула растворенного метана, проанализированная с использованием методики “Keeling plot” (соотношение изотопных данных и 1000/концентрация метана в газовой фазе): *a* – данные по  $\delta^{13}\text{C}$  метана; *б* – данные по  $\delta\text{D}$  метана [98].

изотопной формулы метана при его движении к поверхности воды. Напротив, самые легкие значения как для  $\delta^{13}\text{C}$ , так и для  $\delta\text{D}$  регистрировались в поверхностном слое воды, при этом концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды на этих станциях были максимальными (до  $5\ \mu\text{M}$ ) и во льду регистрировались массивные включения пузырей (рис. 10). Самым тяжелым значениям  $\delta^{13}\text{C}$  соответствовали самые тяжелые значения  $\delta\text{D}$  и более низкие, хотя и относительно высокие, концентрации растворенного метана.

В результате анализа изотопных данных, выполненных по методике “Keeling plot”, было также показано, что разнообразие полученных данных не может быть достоверно объяснено процессами окисления растворенного метана. В случаях, когда окисление является ведущим процессом, определяющим динамику изотопных характеристик, все разнообразие значений укладывается в линейный тренд. В действительности полученные значения в линейный тренд не укладывались, а выделялись в отдельные группы (рис. 15).

Результаты последних полных изотопных исследований, включая радиоуглеродный возраст метана, свидетельствуют об утяжелении  $\delta^{13}\text{C}$  метана от прибрежной зоны к кромке шельфа от типично биогенных значений [55] до термогенных [99], что предполагает вовлечение гигантских неучтенных запасов глубинного метана в современные климатические и биогеохимические циклы. Предварительные результаты анализа изотопного отношения ( $\text{He}_{3/4}$ ) и неона в водной толще МВА показали наличие мантийного источника (D. Hilton & D. Porcelli, 2009, личное сообщение), что еще раз свидетельствует о достоверности нашей гипотезы, подтвержденной многолетними геофизическими данными, заверенными авторским бурением, о нарушении сплошности и газопроницаемости подводной мерзлоты МВА путем образования сквозных таликов – газовыводящих каналов для разгрузки метана и глубинного флюида [17, 20, 21, 53, 56, 57].

Консервативная оценка эмиссии из мелководной части МВА в атмосферу составляет приблизительно  $17\ \text{Tg}$  [53], что примерно в 3 раза выше оценки для Мирового океана. Однако с учетом более поздних оценок [56] данная величина будет пересмотрена в ближайшее время в сторону значительного увеличения. Это значит, что даже при рассмотрении минимальных оценок шельф МВА может рассматриваться как основной современный морской источник поступления  $\text{CH}_4$  в атмосферу. Эта оценка включает в себя все процессы: поступление  $\text{CH}_4$  из донных источников, а также микробное образование и окисление в осадках и водной толще. Если возвратиться к наличию атмосферного максимума  $\text{CH}_4$  над Арктикой (рис. 3), становится очевидным, что исследуемый источник играет более важную роль по сравнению с антропогенным источником, который сконцентрирован в умеренных широтах Северного полушария.

## **2. О роли Арктики (система суша–шельф) в глобальном цикле углерода в ближайшем будущем**

### **2.1. Суша**

Зона распространения многолетней мерзлоты охватывает 58% территории Российской Федерации. В ее пределах расположено большое число населенных пунктов, промышленных предприятий и объектов инфраструктуры. При условии сохранения современной тенденции к потеплению южная граница распространения многолетней мерзлоты может продвинуться к концу XXI в. на 300–400 км на север [8], что вызовет множество геоинженерных проблем, включая ущерб портовой инфраструктуре, обмеление фарватеров и т.д. В климатическом аспекте, это приведет к расконсервации и мобилизации значительных запасов древнего ОБ, что проявится в усилении респирации почв и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу, в увеличении стока растворенного ОБ с реками, которые характеризуются низкими значениями рН. Вероятно, что транспорт минерального углерода, включая растворенную двуокись углерода, также увеличится, что наряду с увеличением стока кислотных речных вод может проявиться в увеличении кислотности вод СЛО (acidification). Маловероятно, что роль твердого речного стока возрастет, так как на примере р. Лена показано [84], что основная часть речной взвеси выпадает в дельте (гидродинамическое осаждение) и на маргинальном фильтре. За последние 30–40 лет XX в. средние температуры воздуха над Северной Азией и Аляской увеличились на 1–2 °С, в основном за счет зимнего потепления [8], что привело к меньшему промерзанию активного слоя мерзлоты зимой и более значимому оттаиванию летом, сокращению морозных дней и раннему вскрытию рек при их позднем замерзании и увеличению речного стока [100]. Предполагается, что к концу XXI в. температура воздуха в высоких широтах Северного полушария значительно повысится [9, 14]. Максимальное потепление (до 10–12 °С) ожидается в прибрежной зоне и водосборах рек Восточной Сибири, что может привести к деградации наземной мерзлоты, включая береговой ледовый комплекс, обогащенный древним биолабильным ОБ [8].

Основную роль в осадконакоплении и биогеохимии мелкого шельфа МВА играет экспорт эрозионного ОУ (берегового ледового комплекса, рис. 5, 6), а окисление эрозионного ОУ представляется основным фактором, ответственным за экстремальную асидификацию вод МВА [73, 84]. Развитие термокарста может привести к увеличению заозеренности в отдельных районах и соответствующему увеличению эмиссии метана в атмосферу. Однако маловероятно, что динамика этого процесса будет достаточно высока для повышения глобальных оценок потенциальной эмиссии, так как в районах сплошной мерзлоты скорость термокарста невысока из-за низких фоновых температур мерзлоты (примерно –11 °С на севере Якутии [53]) и ее термической инертности. Более того, как показано в [102], увеличение площади озер в области сплошной мерзлоты полностью компенсируется дренажом озер в области несплошной и островной мерзлоты. Тем не менее в масштабе десятков и сотен лет следует ожидать значительного повышения эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу благодаря возрастающей респирации почв Севера [103], особенно в зимний период, когда респирация не компенсируется продукцией. Повышение температуры приведет к возрастающему грунтовому и подмерзлотному стоку, к еще большему увеличению стока сибирских рек [100, 101] обогащенному  $\text{CO}_2$  в СЛО. Эти процессы, включая прогрессирующую эрозию берегового ледового комплекса (рис. 5), приведут к усилению экологического прессинга на экосистемы акватории Северного морского пути, в первую очередь за счет прогрессирующей асидификации вод, что может привести к угнетению функционирования бентосных сообществ – основной кормовой базы крупнейших млекопитающих Арктики – моржей и белых медведей.

### **2.2. Шельф**

Как было показано выше, в холодные климатические эпохи, когда уровень океана падает на 100–120 м, обширный ( $2,1 \times 10^6 \text{ км}^2$ ) и мелководный (средняя глубина <50 м) шельф МВА обнажается и становится частью сибирской приморской низменности. В результате глубокого промерзания здесь формируется мерзлота и создаются благоприятные условия

для формирования мелкозалегающей зоны стабильности арктических газгидратов [18, 19], которые, в отличие от океанических газгидратов, характеризуются: высокой концентрацией в пространстве, мощностью залегания пластов, высоким процентом порового насыщения (20–80% в отличие от 1–2% в океанических газгидратах), высокой нестабильностью (для дестабилизации газгидрата, образованного при температуре  $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , требуется в 3 раза меньше энергии, чем для газгидрата, образованного при температуре  $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [104]. Кроме того, зона стабильности арктических газгидратов определяется стабильностью мерзлоты [17, 21]. При смене субэкральной обстановки на субмаринную происходит закономерное изменение термического режима мерзлоты, которая переходит в подводное положение, что приводит к ее деградации в условиях последующей дестабилизации зоны устойчивости стабильности газгидратов. За 5–6 тыс. лет подводная мерзлота приходит в равновесие с придонной водой (среднегодовая температура воды изменяется от близкой к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вблизи устьев крупных рек, до  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зонах заприпайных полыней), что приводит к потеплению подводной мерзлоты на  $12\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. к температуре, близкой к фазовому переходу (таянию). По сравнению со стабильной сплошной наземной мерзлотой, температура которой до сих пор не поднялась выше  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , подводная мерзлота находится в транзите – вблизи фазового перехода [53, 57]. При нарушении целостности мерзлоты свободный газ из разрушенных газгидратов поступает в водную толщу и далее в атмосферу [17, 21]. Показано, что МВА являются уникальным регионом, поскольку  $>80\%$  предполагаемой подводной мерзлоты и мелководных арктических газгидратов находится в МВА (рис. 16).

Учитывая, что на шельфе МВА содержится примерно 1750 Гт углерода в форме газовых гидратов (750 Гт), природного газа (500 Гт) и собственно ОВ мерзлоты (500 Гт), а в современной атмосфере содержится примерно 750 Гт С-СО<sub>2</sub> и 4 Гт С-СН<sub>4</sub> [8, 9, 17–21], становится очевидным что вовлечение в круговорот углерода из подводной мерзлоты, даже в малых долях процентов от общего объема углеродного резервуара мерзлоты, может привести к существенному увеличению общего содержания СН<sub>4</sub> в атмосфере [17, 21]. Предполагая, что под сквозными таликами гидраты уже дестабилизированы, и полагая, что площадь сквозных таликов на шельфе МВА составляет 5–10% [49], потенциальная эмиссия в атмосферу может составить от 37,5 до 75 Гт, что при различных сценариях кинетики поступления в атмосферу [105] может вызвать потепление климата, по крайней мере сопоставимое с эффектом от предполагаемого удвоения содержания СО<sub>2</sub> в атмосфере до конца 2100 г. [9]. Дополнительное воздействие на нарушение сплошности подводной мерзлоты и формирование каналов выброса метана может играть повышенная сейсмостектоническая активность на границе Евро-Азиатской и Северо-Американской тектонических плит и в рифтовой зоне МВА [106].

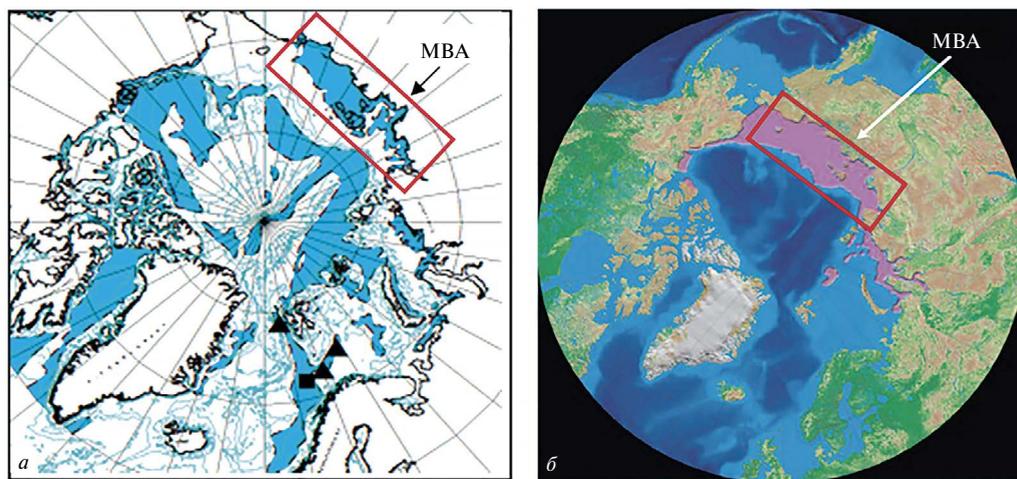


Рис. 16. Предполагаемые области распространения мелководных арктических газгидратов (а) и подводной мерзлоты (б).

Более того, последняя оценка вклада  $\text{CH}_4$  в потенциал глобального потепления (рекомендованный Киотским протоколом), рассчитанная для ближайших 100 лет с включением ранее неучитываемых обратных связей в климатической системе, показала, что ранние оценки [9] недоучитывали климатическую роль  $\text{CH}_4$  примерно на 20–40%. Это значит, что суммарный радиационный форсинг от 1 кг  $\text{CH}_4$  превышает аналогичную величину для  $\text{CO}_2$  примерно в 35 раз, а не в 25, как было принято считать недавно. Данная величина пока не учитывает положительную обратную связь, выявленную между потеплением–деградацией подводной мерзлоты [17, 21] и дополнительной эмиссией  $\text{CH}_4$  (и  $\text{CO}_2$  как продукта окисления  $\text{CH}_4$ ) в атмосферу, обусловленных вовлечением гигантских ранее недоступных пулов гидратов, ОВ и природных газов в современный биогеохимический цикл.

### 2.3. Геополитические аспекты

Исходя из вышеизложенного становится понятной обеспокоенность ученых и политических деятелей, которые планируют пересмотр Киотского протокола и Парижского соглашения, одним из недостатков которого является недоучет биогеохимических и климатических последствий прогрессирующей деградации мерзлоты в арктической системе суша–шельф, способных привести к серьезным социальным и экономическим проблемам глобального масштаба.

Роль выбросов основных парниковых газов, двуокиси углерода и метана, в результате деградации наземной мерзлоты, оценивается в сумму «только» в US\$43 трлн до конца следующего столетия (2200 г.), что составляет примерно 8% от ожидаемого интегрального ущерба, вызванного антропогенным потеплением [107], т.е. ежегодный экономический ущерб от относительно медленной (“gradual”) деградации наземной мерзлоты оценивается величиной примерно на два порядка ниже, чем от дезинтеграции подводной мерзлоты и выбросов метана из шельфа МВА [108]. В этом контексте важно отметить, что, согласно последним работам американских ученых, последствия деградации только наземной мерзлоты проявляются в увеличении эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферу за счет микробиальных процессов трансформации мобилизованного древнего ОВ [109]. Авторы указанной работы приходят к выводу о том, что этот неучтенный источник парниковых газов может привести к полному пересмотру Киотского и Парижского протоколов, основанных исключительно на парадигме доминирующей роли антропогенного фактора – без учета соответствующих изменений в природном цикле углерода, которые проявляются в массивных выбросах  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  из деградирующей мерзлоты (сезонно-талого слоя, озер, рек и болот) в атмосферу. Зимняя эмиссия из почв Севера в начале 1990-х была оценена в 1 Гт С- $\text{CO}_2$ , что соизмеримо с антропогенным годовым выбросом со всей территории СССР – на то время [103]. Однако этот результат, полученный российскими учеными, так и не был включен в рассмотрение ИРСС (2001) и не был востребован климатическим сообществом в России. Недоучетом этого фактора может стать значительная переоценка роли лесов как поглотителей атмосферного  $\text{CO}_2$ , что может существенно откорректировать экономический эффект от «зеленой революции» в терминах международной торговли квотами на чистый воздух.

Наибольшее беспокойство у мирового сообщества вызывает *возрастающая роль метанового фактора, обусловленного массивными выбросами метана из деградирующего шельфа морей Восточной Арктики, в предполагаемых «быстрых» изменениях климата.* Одно из первых обсуждений в этом направлении (открытом и развитом авторами данной работы с партнерами из ведущих университетов и институтов) состоялось 9 декабря 2009 г. в Копенгагене (M. Sommerkorn, November 2009, личное сообщение). Для иллюстрации глобальной важности этой темы исследования на современном этапе приведем фрагмент стратегического плана развития арктических исследований в рамках ЕС (октябрь 2021 г): “Joint Communication on a stronger EU engagement for a peaceful, sustainable and prosperous Arctic” ([https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage/105481/joint-communication-stronger-eu-engagement-peaceful-sustainable-and-prosperous-arctic\\_en](https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage/105481/joint-communication-stronger-eu-engagement-peaceful-sustainable-and-prosperous-arctic_en)).

Экономический негативный эффект, обусловленный выбросом в атмосферу незначительной доли (1–5%) от предполагаемого метанового гидратного потенциала (консервативная оценка) шельфа МВА, оценивается авторитетными международными организациями

от US\$80 млрд в год, начиная с 2030 г., с основным ущербом на территории Российской Федерации ([go.nature.com/vnlzax](https://go.nature.com/vnlzax), <https://www.nature.com/articles/500529c>), и до US\$60 трлн (экстремальный сценарий) – в случае выброса примерно 50 Гт метана в течение 10 лет, что приведет через 15–35 лет после такого массивного выброса к дополнительному потеплению климата примерно на 2 °C [108]. Основной экономический ущерб связывается с усилением атмосферной циркуляции и циклогенеза, повышением уровня океана, наводнениями и потерей традиционных промыслов коренных народов Севера. На Климатическом саммите в Глазго ученые пришли к выводу, что данный процесс невозможно остановить, но необходимо искать пути адаптации [110]. Из этого следует, что в долгосрочной перспективе ущерб от дестабилизации только предполагаемого потенциала гидратов МВА, который контролируется состоянием подводной мерзлоты, может быть весьма существенным для социально-экономического развития не только России, но и в планетарном масштабе. Вышеприведенные результаты экономических расчетов Бизнес-школы Университета Кембридж [109] были выполнены на основе оценок авторов данного доклада (<https://www.cam.ac.uk/research/news/cost-of-arctic-methane-release-could-be-size-of-global-economy-warn-experts>), опубликованного в 2010 г. [32], из анализа которого следует, что это направление исследований является приоритетным в области наук о Земле.

Расширенные результаты, изложенные в этой статье, были представлены Министерством иностранных дел РФ в качестве вклада Российской Федерации в Арктический совет для совместной экспертизы и развития взаимовыгодного сотрудничества; в середине февраля 2022 г. получена поддержка Шведского полярного научного секретариата, уполномоченных представителей Швеции и Норвегии для включения темы данного проекта в приоритеты международного комитета АМАР. К сожалению, сотрудничество с Арктическим советом было прервано по инициативе западных стран-участников после начала СВО. После завершения председательства РФ в АС в мае 2023 г. ситуация по сотрудничеству с зарубежными партнерами еще более усложняется за счет ряда ограничений, введенных на время СВО. Однако фундаментальные исследования по теме проекта продолжают в рамках совместных публикаций со стратегическими партнерами из Швеции (группа профессора Стокгольмского университета Орьяна Густафсона, академика Шведской Королевской академии наук, члена Нобелевского совета по химии), Италии (профессор Томассо Тези из Болонского университета) и США (профессор Янек Мартенс, обсерватория Ламонт Догерти), что после окончания СВО может стать научной платформой для возобновления полномасштабных совместных исследований и являться залогом успеха в решении сложнейших научных проблем человечества, связанных с функционированием арктической климатической системы. Мировое научное сообщество проявляет большое беспокойство в этом отношении, что частично изложено в редакторской статье в журналах *Nature* (607, 422, 21 July 2022), и *Science of the Total Environment* (902, 4 August 2023). Представляется перспективным рассмотреть на уровне Правительства и Президента РФ возможность создания Международного арктического сибирского научного центра, в который бы могли войти заинтересованные ученые из стран БРИКС. Создание такого Центра могло бы стать началом новой парадигмы обеспечения климатической безопасности нашей планеты, при лидерской роли Российской Федерации, – путем повышения достоверности климатической теории, что является необходимым условием для устойчивого социально-экономического развития Арктики и других регионов.

## Заключение

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов.

- Баланс CO<sub>2</sub> в арктической системе суша–шельф–атмосфера определяется темпами деградации мерзлоты и характерными особенностями транспорта и трансформации органического вещества, мобилизованного в современные биогеохимические циклы вследствие деградации наземной мерзлоты.
- Экологическое состояние акватории Северного морского пути определяется ростом речного стока и прогрессирующим транспортом и трансформацией эрозионного углерода с окислением до CO<sub>2</sub>, что приводит к экстремальной асидификации (подкислению) толщи вод;

это может привести к труднопредсказуемым биогеохимическим последствиям, включая ущерб бентосным сообществам – основной пищевой базы для крупных млекопитающихся (моржи, белые медведи).

- МВА являются источником поступления метана в атмосферу Арктического региона и важной составной частью морского цикла метана, поскольку ежегодная эмиссия метана в атмосферу Арктического региона из МВА значительно превышает ежегодную эмиссию метана из акваторий всех морей Мирового океана.

- Метан поступает в придонную воду из донных отложений в форме струй пузырьков и в виде растворенного газа (растворение пузырьков, латеральный и диффузионный транспорт), о чем свидетельствуют характер вертикального распределения концентраций в водном столбе, наличие областей экстремально высоких концентраций, превышение зимних концентраций над летними, превышение поверхностных концентраций над придонными, а также геофизические данные, с помощью которых были зарегистрированы массивированные выбросы пузырей в водную толщу–атмосферу.

- Мощность современной эмиссии метана в МВА, а также ее будущий прирост зависят от степени вовлечения в современный биогеохимический цикл метана и органического углерода, накопленного в донных отложениях в предыдущие климатические эпохи, и не зависят от современной продукции в осадках, в водном столбе и от латерального переноса из наземных источников. Количественные характеристики современных потоков метана в МВА и их пространственно-временная изменчивость зависят от наличия газопроводящих путей в структуре осадочной толщи.

- Результаты моделирования подводной мерзлоты с включением ранее неучтенных факторов, таких как засоленность осадков и связанное с этим наличие в структуре мерзлых осадков незамерзшей воды, предшествующее затоплению развитие процессов термокарста, в частности подозерных таликов, а также структуры донных отложений, включающих слои слабоминерализованных и сильноминерализованных осадков, и их тестирование данными натурных наблюдений показали, что развитие газовыводящих каналов в форме сквозных или глубоких таликов допускается в районах не только прямого, но также и непрямого влияния рифтовых зон.

- Состояние подводной мерзлоты служит ведущим фактором геологического контроля потоков метана в водную толщу и определяет пространственно-временную изменчивость потоков метана в атмосферу. В результате дестабилизации подводной мерзлоты формируются газопроводящие пути, по которым метан поступает в водную толщу. Основным механизмом формирования таких путей является развитие восходящих, нисходящих и комбинированных таликов. Особую роль играют талики тектоногенного происхождения, что связано с аномально высокими значениями геологического теплового потока.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Ye.S., Lorius C. Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub> // Nature. 1987. Vol. 329. P. 408–414.
2. Chappellaz J., Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Ye.S., Lorius C. Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years // Nature. 1990. Vol. 345. P. 127–131.
3. Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000) // Nature. 1987. Vol. 329, N6138. P. 403–408.
4. Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappelaz J., Genthon G., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stivenard M., Yiou F., Yiou P. Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period // Nature. 1993. Vol. 364. P. 407–412.
5. Lorius C., Barkov N.I., Jouzel J., Korotkevich Ye.S., Kotlyakov V.M., Raynaud D. Antarctic Ice Core: CO<sub>2</sub> and climatic change over the last climatic cycle // EOS. 1988. Vol. 69, N26. P. 681–684.
6. Lorius C., Jouzel J., Raynaud D., Hansen J., Letret H. The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming // Nature. 1990. Vol. 347. P. 139–145.

7. Serreze M. C., Francis J. The Arctic amplification debate // *Climatic Change*. 2006. Vol. 76 (3/4). P. 241–264. DOI: 10.1007/s10584-005-9017.
8. ACIA (Arctic Climate Impact Assessment): Overview report. Cambridge Univ. Press, 2004. 140 p.
9. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 881 p.
10. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 351 с.
11. Имбри Дж., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. М.: Прогресс, 1988. 263 с.
12. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 373 с.
13. Lewis S. L., Maslin M. A. Defining the Anthropocene // *Nature*. 2015. Vol. 519. P. 171–180.
14. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. H. Lee, J. Romero; Core Writing Team; IPCC. Geneva, Switzerland, 2023. P. 35–115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
15. Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. GB2023. DOI: 10.1029/2008GBO3327.
16. Semiletov I. P., Shakhova N. E., Sergienko V. I., Pipko I. I., Dudarev O. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System // *Environment Research Letters*. 2012. N7. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201.
17. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. Vol. 9 (6).
18. Криотермия и натуральные газгидраты в Северном Ледовитом океане / под ред. В. А. Соловьева. Л.: Севморгеология, 1987. 150 с.
19. Gramberg I. S., Kulakov Yu. N., Pogrebitsky Yu. E., Sorokov D. S. Arctic oil and gas super basin // X World Petroleum Congress. London, 1983. P. 93–99.
20. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Salyuk A., Rekant P., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115 (C8).
21. Shakhova N. E., Semiletov I. P. Methane Hydrate Feedbacks // *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications* / eds. Martin Sommerkorn, Susan Joy Hassol. Published by WWF International Arctic Programme August, 2009. P. 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1.
22. Заварзин Г. А., Кларк У. Биосфера и климат: взгляд биолога // *Природа*. 1987. № 6. С. 65–77.
23. Canadell J. G., Raupach M. R. Land Carbon Cycle Feedbacks // *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications* / eds. Martin Sommerkorn, Susan Joy Hassol. Published by WWF International Arctic Programme August, 2009. P. 69–80. ISBN: 978-2-88085-305-1.
24. Genthon C., Barnola J. M., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Barkov N. I., Korotkevich Ye. S., Kotlyakov V. M. Vostok ice core : climatic response to CO<sub>2</sub> and orbital forcing changes over the last climatic cycle // *Nature*. 1987. Vol. 329, N6138. P. 414–418.
25. Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 429–436. DOI:10.1038/20859.
26. Rigby M., Prinn R. G., Fraser P. J. et al. Renewed growth of atmospheric methane // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L22805. DOI: 10.1029/2008GL036037.
27. Semiletov I. P., Zimov S. A., Voropaev Yu. V., Davydov S. P., Barkov N. I., Gusev A. N., Lipenkov V. Ya. Atmospheric methane in past and present // *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci.* 1994. Vol. 339, N2. P. 253–256.
28. Semiletov I. P., Pipko I. I., Pivovarov N. Ya., Popov V. V., Zimov S. A., Voropaev Yu. V., Davydov S. P. Atmospheric carbon emission from North Asian Lakes: a factor of global significance // *Atmospheric Environment*. 1996. Vol. 30, N10/11. P. 1657–1671.
29. Semiletov I. P. On aquatic sources and sinks of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the Polar Regions // *J. Atmos. Sci.* 1999. Vol. 56. P. 286–306.
30. Zimov S. A., Voropaev Yu. V., Semiletov I. P. et al. North Siberian Lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon // *Science*. 1997. Vol. 277. P. 800–802.
31. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. Vol. 327 (5970). P. 1246–1250.

32. Shakhova N.E., Alekseev V.A., Semiletov I.P. Predicted methane emission on the East Siberian shelf // *Doklady Earth Sciences*. 2010. Vol. 430 (2). 190–193.
33. Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D. et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment // *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* / eds. C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker et al. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. P. 109–230.
34. Dutton A., Carlson A.E., Long A.J., Milne G.A., Clark P.U., DeConto R., Horton B.P., Rahmstorf S., Raymo M.E. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods // *Science*. 2015. Vol. 349. aaa4019. DOI: 10.1126/science.aaa4019.
35. Solomon S., Plattner G.-K., Knutti R., Friedlingstein P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions // *PNAS*. 2009. Vol. 106 (6). P. 1704–1709.
36. Semiletov I.P. Ancient Ice Air Content of the Vostok Ice Core // *Biogeochemistry of Trace Gases* / ed. S. Oremland. New York: Chapman and Hall Inc., 1993. P. 46–59.
37. Семилетов И.П. Углеродный цикл и глобальные изменения в прошлом и настоящем // *Химия морей и океанов* / ред. О.К. Бордовский. М.: Наука, 1995. С. 130–154.
38. Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J. Methane hydrates in Quaternary Climate Change. Washington, D.C.: AGU, 2003. 317 p.
39. Kvenvolden K.A. Gas hydrates: Geological perspective and global change // *Rev. Geophys.* 1993. Vol. 31. P. 173–187.
40. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. Оценка возможности быстрого метанового потепления 55 млн лет назад // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 413 (6).
41. Chappellaz J., Blunier T., Raynaud D., Barnola J.M., Schwander J., Stauffer B. Synchronous changes in atmospheric CH<sub>4</sub> and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP // *Nature*. 1993. Vol. 336. P. 443–445.
42. Etheridge D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R.L. Atmospheric methane between 1000 A. D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1998. Vol. 103 (D13). P. 15979–15993.
43. Sapart C.J., Monteil G., Prokopiou M., van de Wal R.S.W., Kaplan J.O., Sperlich P. et al. Natural and anthropogenic variations in methane sources during the past two millennia // *Nature*. 2012. Vol. 490 (7418). P. 85–89.
44. Rasmussen R.A., Khalil M.A.K. Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends and interhemispheric gradient // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89, N D7. P. 11599–11605.
45. Chappellaz J. et al. Changes in atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during Holocene // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (D13). P. 15987–15997.
46. Dallenbach A., Blunier T., Fluckiger J., Stauffer B. Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene // *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27 (7). P. 1005–1008.
47. Cuffey K.M., Clow G.D., Alley R.B., Stuiver M., Waddington E.D., Saltus R.W. Large Arctic Temperature Change at the Wisconsin-Holocene Glacial Transition // *Science*. 1995. Vol. 270. P. 455–458.
48. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. Озерный термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // *Криосфера Земли*. 1999. Т. 3, № 3. С. 79–91.
49. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // *Geo-Marine Letters*. 2005. Vol. 25 (2). P. 167–182.
50. Feely R.A., Sabine C.L., Takahashi T., Wanninkhof R. Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: the Global CO<sub>2</sub> Survey // *Oceanography*. 2001. Vol. 14, N4. P. 18–32.
51. Takahashi T., Sutherland S.C., Sweeney C., Poisson A., Metz N., Tillbrook B., Bates N., Wanninkhof R., Feely R.A., Sabine C., Olafsson J., Nojiri Y. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects // *Deep-Sea Res.* 2002. Vol. 2, N49. P. 1601–1622.
52. Shakhova N., Semiletov I., Pantelev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32 (9).
53. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7 (1). P. 64–70.
54. Wild B., Shakhova N., Dudarev O., Semiletov I. et al. Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. P. 50–57. DOI:10.1038/s41467-022-32696-0.

55. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I., Jansen J., Szidat S., Kosmach D., Dudarev O., van der Veen C., Egger M., Sergienko V., Salyuk A., Tumskoy V., Tison J.L., Rockmann T. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosciences*. 2017. Vol. 14, N9. P. 2283–2292.
56. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. Vol. 373 (2052). 20140451.
57. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8 (1). 15872.
58. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
59. Романкевич Е. А., Ветров А. А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
60. Романкевич Е. А., Ветров А. А. Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с. ISBN: 978-5-89118-835-8. DOI: 10.34756/GEOS.2021.16.37857.
61. Арктика на пороге третьего тысячелетия / под ред. И. С. Грамберга и др. СПб.: Наука, 2000. 247 с.
62. The organic carbon cycle in the Arctic ocean / eds. R. Stein, R. W. Macdonald. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2003. 363 p.
63. Бордовский О. К., Семилетов И. П. Обмен углеродом между придонной водой и донными осадками Охотского моря // *Доклады АН СССР*. 1989. Т. 306, № 3. С. 697–700.
64. Pipko I., Semiletov I., Tishchenko P., Pugach S., Christensen J. Carbonate Chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea // *Progress in Oceanography*. 2002. Vol. 55. P. 77–94.
65. Pipko I. I., Pugach S. P., Semiletov I. P., Anderson L. G., Shakhova N. E., Gustafsson Ö., Repina I. A., Spivak E. A., Charkin A. N., Salyuk A. N., Shcherbakova K. P., Panova E. V., Dudarev O. V. The dynamics of the carbon dioxide system in the outer shelf and slope of the Eurasian Arctic Ocean // *Ocean Sci*. 2017. Vol. 13. P. 997–1016.
66. Пипко И., Семилетов И., Пугач С. О карбонатной системе вод Восточно-Сибирского моря // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 402, № 3. С. 398–401.
67. Semiletov I. P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters // *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci*. 1999. Vol. 368. P. 679–682. (Translated into English).
68. Semiletov I. P., Makshtas A. P., Akasofu S., Andreas E. Atmospheric CO<sub>2</sub> balance: The role of Arctic sea ice // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31, N5. L05121. DOI: 10.1029/2003GL017996.
69. Bates N. Marine Carbon Cycle Feedbacks // *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications* / eds. Martin Sommerkorn, Susan Joy Hassol. Published by WWF International Arctic Programme August, 2009. P. 55–68. ISBN: 978-2-88085-305-1.
70. Semiletov I., Dudarev O., Luchin V., Charkin A., Shin K., Tanaka N. The East-Siberian Sea as a transition zone between the Pacific origin water and local shelf water // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. L10614. DOI: 10.1029/2005GL022490.
71. Rusanov I. I., Savvichev A. S., Zasko D. N., Sigalevich P. A., Pipko I. I., Pugach S. P., Pimenov N. V., Semiletov I. P. Primary production and microbial heterotrophy in the Siberian arctic seas, Bering Strait, and Gulf of Anadyr, Bering Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2024. Vol. 299. 108673.
72. Semiletov I., Pipko I. I., Repina I. A., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic // *Journal of Marine Systems*. 2007. Vol. 66. P. 204–226.
73. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L. G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Charkin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N. Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9. P. 361–365. DOI: 10.1038/NCEO2695.
74. Pugach S. P., Pipko I. I., Shakhova N. E., Shirshin E. A., Perminova I. V., Gustafsson Ö. et al. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Sci*. 2018. Vol. 14 (1). P. 87–103.
75. Macdonald R. W., Anderson L. G., Christensen J. P., Miller L. A., Semiletov I. P., Stein R., The Arctic Ocean: budgets and fluxes // *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis* / eds. K.-K. Liu, L. Atkinson, R. Quinones, L. Talaue-McManus. Springer-Verlag, 2008. P. 291–303.

76. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., Nishino S. Space-time dynamics of carbon stocks and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 5977–5996. DOI: 10.5194/bg-10-5977-2013.
77. Belzil C., Roesler C.S., Christensen J.P., Shakhova N., Semiletov I. Fluorescence measured using the WETStar DOM fluorometer as a proxy for dissolved matter absorption // *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2006. Vol. 67. P. 41–449.
78. Kaltin S., Anderson L.G. Uptake of atmospheric carbon dioxide in Arctic shelf seas: evaluation of the relative importance of processes that influence pCO<sub>2</sub> in water transported over the Bering-Chukchi Sea shelf // *Mar. Chem.* 2005. Vol. 94. P. 67–79.
79. Gosink T.A., Pearson J.G., Kelley J.J. Gas movement through sea ice // *Nature*. 1976. Vol. 263. P. 41–42.
80. Kelley J.J., Gosink T.A. Gases in Sea Ice. Final Report: Contract N000 14-76C-0331, Institute of Marine Science, University of Alaska, Fairbanks, Alaska, 1979. 107 p.
81. Semiletov I.P. On seasonal variability of hydrocarbon gases and dissolved oxygen in the Uglovoye Bay, the Japan Sea // *Proc. Far-Eastern Hydrometeorological Institute*. 1987. Vol. 131. P. 80–84. (In Russ.).
82. Alling V., Sanchez-Garcia L., Porcelli D., Pugach S., Vonk J., van Dongen B., Mörth C.M., Anderson L.G., Sokolov A., Andersson P., Humborg C., Semiletov I., Gustafsson Ö. Non-conservative behavior of dissolved organic carbon across the Laptev and East Siberian seas // *Global Biogeochemical Cycles*. 2010. Vol. 24. GB4033.
83. Vonk J.E., Sánchez-García L., van Dongen B.E., Alling V., Kosmach D., Charkin A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Shakhova N., Roos P., Eglinton T.I., Andersson A., Gustafsson Ö. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia // *Nature*. 2012. Vol. 489 (7414). P. 137–140.
84. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., Gustafsson Ö. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. P. 2407–2426.
85. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O., Ingri J., Anderson P., Dudarev O., White D. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial carbon export // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. GB1036. DOI: 10.1029/2003 GBO 02087.
86. Vetrov A.A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Peresipkin V.I., Charkin A.N. Study of composition and origin of organic matter in the East-Siberian Sea bottom sediments // *Geokhimiya (Geochemistry)*. 2008. Vol. 3. P. 183–195. (Translated in English).
87. Pipko I.I., Semiletov I.P., Tischenko P. Ya., Pugach S.P., Savelieva N.I. Carbon System Parameters Variability in the East-Siberian Sea Coastal-Shelf Zone during Fall Season // *Okeanologiya (Oceanology)*. 2008. Vol. 48 (1). P. 59–72. (Translated in English).
88. Pipko I.I., Semiletov I.P., Pugach S.P., Wahlström I., Anderson L.G. Interannual variability of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and carbon system in the East Siberian Sea // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. P. 1987–2007. DOI: 10.5194/bg-8-1987-2011.
89. Anderson L.G., Jutterström S., Hjalmarsson S., Wahlström I., Semiletov I.P. Out-gassing of CO<sub>2</sub> from Siberian Shelf seas by terrestrial organic matter decomposition // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. L20601. DOI: 10.1029/2009GL040046.
90. Semiletov I.P., Pipko I.I. Sinks and sources of carbon dioxide in the Arctic Ocean // *Transactions of Russian Academy of Sciences*. 2007. Vol. 414 (3). (Translated in English by Springer).
91. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // *Journal of Marine Systems*. 2007. Vol. 66 (1/4). P. 227–243.
92. Savvichev A.S., Rusanov I.I., Pimenov N.V., Zakharova E.E., Veslopolova E.F., Lein A.Y., Crane K., Ivanov M.V. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Chukchi Sea // *Microbiology*. 2007. Vol. 76. P. 603–613. DOI: 10.1134/S0026261707050141.
93. Namsaraev B.B., Rusanov I.I., Mitskevich I.N., Veslopolova E.F., Bolshakov A.M., Egorov A.V. Bacterial methane oxidation rates in waters and sediments of the Kara Sea and the Yenisey River estuary. Supplement to: Namsaraev B.B. et al. Bacterial oxidation of methane in the Yenisey River estuary and the Kara Sea // *Oceanology*. 1995. Vol. 35 (1). P. 80–85.
94. Are F.E. The problem of the emission of deep-buried gases to the atmosphere // *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources* / eds. R. Paepé., V.P. Melnikov, E. van Overloop, V.D. Gorokhov. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2001. P. 497–509.

95. Зубов Н.Н. Морские воды и льды. Л.: Гидрометеиздат, 1938. 454 с.
96. Reeburg W.S. Oceanic methane biogeochemistry // *Chem. Rev.* 2007. Vol. 107. P. 486–513.
97. Shakhova N.E., Nicolsky D., Semiletov I.P. On the current state of sub-sea permafrost in the East-Siberian Shelf: testing of modeling results by observational data // *Transactions of Russian Academy of Sciences.* 2009. Vol. 429 (5). (Translated in English by Springer).
98. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Characteristic features of carbon cycle in the shallow shelf of the eastern sector of Russian Arctic // *Environmental and Climate Changes and catastrophes* / eds. N.P. Laverov et al. Moscow: A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, 2008. Vol. 4. P. 167–181.
99. Steinbach J., Holmstrand H., Scherbakova K., Kosmach D., Bruchr V., Shakhova N., Salyuk A., Sapart C., Chernikh D., Noormets R., Semiletov I., Gustafsson O. Source Apportionment of Methane Escaping the Subsea Permafrost System in the Outer Eurasian Arctic Shelf // *Proceedings National Academy of Sciences (PNAS).* 2021. Vol. 118 (10). e2019672118. DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
100. Savelieva N.I., Semiletov I.P., Vasilevskaya L.N., Pugach S.P. A climate shift in seasonal values of meteorological and hydrological parameters for Northeastern Asia // *Progress in Oceanography.* 2000. Vol. 47 (2/4). P. 279–297.
101. Semiletov I.P., Savelieva N.I., Weller G.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Gukov A. Yu., Vasilevskaya L.N. The Dispersion of Siberian River Flows into Coastal Waters: Meteorological, Hydrological and Hydrochemical Aspects // *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean, NATO Meeting* / ed. E.L. Lewis; NATO ASI Series. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 323–367.
102. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // *Science.* 2005. Vol. 308 (5727). 1429.
103. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., Voropaev Yu. V., Prosyannikov S.F., Wong C.S., Chan Y.-H. Wintertime CO<sub>2</sub> emission from soils of Northeastern Siberia // *Arctic.* 1993. Vol. 46. P. 197–204.
104. Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas-hydrates – A potential energy source for the 21st Century // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2007. Vol. 56 (1). P. 14–31.
105. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Modern state of the role of the East Siberian Shelf in the methane cycle // *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2009. Vol. 79, N6. P. 507–518.
106. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Seismotectonics of Yakutia. Moscow: GEOS, 2000. (In Russ.).
107. Hope C., Schaefer K. Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost // *Nature Climate Change.* 2016. Vol. 6. P. 56–59. DOI: 10.1038/nclimate2807.
108. Whitman G., Hope C., Wadhams P. Climate science: Vast costs of Arctic change // *Nature.* 2013. Vol. 449. P. 401–403.
109. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., Treharne R., Duffy P.B., Pomerance R. et al. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2021. Vol. 118 (21). e2100163118.
110. Barnard P.E., Moomaw W.R., Fioramonti L., Laurance W.F., Mahmoud M.I., O'Sullivan J., Rapley C.G., Rees W.E., Rhodes C.J., Ripple W.J., Semiletov I.P., Talberth J., Tucker C., Wysham D., Ziervogel G. World Scientists' Warnings Into Action, Local to Global // *Science Progress.* 2021. Vol. 104, N4. P. 1–32.

## REFERENCES

1. Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Ye.S., Lorius C. Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature.* 1987;329:408–414.
2. Chappellaz J., Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Ye.S., Lorius C. Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years. *Nature.* 1990;345:127–131.
3. Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000). *Nature.* 1987;329(6138):403–408.
4. Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappellaz J., Genthon G., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard M., Yiou F., Yiou P. Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period. *Nature.* 1993;364:407–412.
5. Lorius C., Barkov N.I., Jouzel J., Korotkevich Ye.S., Kotlyakov V.M., Raynaud D. Antarctic Ice Core: CO<sub>2</sub> and climatic change over the last climatic cycle. *EOS.* 1988;69(26):681–684.

6. Lorius C., Jouzel J., Raynaud D., Hansen J., Letret H. The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*. 1990;347:139–145.
7. Serreze M.C., Francis J. The Arctic amplification debate. *Climatic Change*. 2006;76:241–264. DOI: 10.1007/s10584-005-9017.
8. ACIA (Arctic Climate Impact Assessment): Overview report. Cambridge Univ. Press; 2004. 140 p.
9. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2001. 881 p.
10. Bydiko M.I. Climate in the past and present, Leningrad: Hydromet Press; 1980. 351 p. (In Russ.).
11. Imbri J., Imbri K.P. Mystery of ice epochs. Moscow: Prohress Press; 1988. 263 p. (In Russ.).
12. Vernadsky V.I. Chemical structure of the Earth biosphere and surrounding planets. Moscow: Nauka Press; 1965. 373 p. (In Russ.).
13. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015;519:171–180.
14. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Geneva, Switzerland; 2023. P. 35–115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
15. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycle*. 2009;23. GB2023. DOI: 10.1029/2008GBO03327.
16. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Pipko I.I., Dudarev O. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environment Research Letters*. 2012;7. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201.
17. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*. 2019;9(6).
18. Soloviev V.A. (ed.). Cryothermy and natural hydrates in the Arctic Ocean. Leningrad: Sevmorgeologiya Press; 1987. 150 p.
19. Gramberg I.S., Kulakov Yu.N., Pogrebitsky Yu.E., Sorokov D.S. Arctic oil and gas super basin. In: *X World Petroleum Congress*. London; 1983. P. 93–99.
20. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Salyuk A., Rekant P., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010;115(C8).
21. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks. In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol (eds.). Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme August; 2009. P. 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1.
22. Zavarzin G.A., Clark U. Biosphere and climate: biologist's view. *Privoda*. 1987;(6):65–77. (In Russ.).
23. Canadell J.G., Raupach M.R. Land Carbon Cycle Feedbacks. In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol (eds.). Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme August; 2009. P. 69–80. ISBN: 978-2-88085-305-1.
24. Genthon C., Barnola J.M., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Barkov N.I., Korotkevich Ye.S., Kotlyakov V.M. Vostok ice core: climatic response to CO<sub>2</sub> and orbital forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*. 1987;329(6138):414–418.
25. Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999;399:429–436. DOI: 10.1038/20859.
26. Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J. et al. Renewed growth of atmospheric methane. *Geophys. Res. Lett.* 2008;35. L22805. DOI: 10.1029/2008GL036037.
27. Semiletov I.P., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Davydov S.P., Barkov N.I., Gusev A.N., Lipenkov V. Ya. Atmospheric methane in past and present. *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci.* 196;345(5): 155–159.
28. Semiletov I.P., Pipko I.I., Pivovarov N. Ya., Popov V.V., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Davydov S.P. Atmospheric carbon emission from North Asian Lakes: a factor of global significance. *Atmospheric Environment*. 1996;30(10/11):1657–1671.
29. Semiletov I.P. On aquatic sources and sinks of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the Polar Regions. *J. Atmos. Sci.* 1999;56:286–306.
30. Zimov S.A., Voropaev Yu. V., Semiletov I.P. et al. North Siberian Lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon. *Science*. 1997;277:800–802.

31. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*. 2010;327(5970):1246–1250.
32. Shakhova N.E., Alekseev V.A., Semiletov I.P. Predicted methane emission on the East Siberian shelf. *Doklady Earth Sciences*. 2010;430(2):190–193.
33. Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D. et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2012. P. 109–230.
34. Dutton A., Carlson A.E., Long A.J., Milne G.A., Clark P.U., DeConto R., Horton B.P., Rahmstorf S., Raymo M.E. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*. 2015;349. aaa4019. DOI: 10.1126/science.aaa4019.
35. Solomon S., Plattner G.-K., Knutti R., Friedlingstein P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS*. 2009;106(6):1704–1709.
36. Semiletov I.P. Ancient Ice Air Content of the Vostok Ice Core. In: Oremland S. (ed.). *Biogeochemistry of Trace Gases*. New York: Chapman and Hall Inc.; 1993. P. 46–59.
37. Semiletov I.P. Carbon cycle and global changes in the past and present. In: *Chemistry of seas and oceans*. Moscow: Nauka Press; 1995. P. 130–154. (In Russ.).
38. Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J. Methane hydrates in Quaternary Climate Change. Washington, D.C.: AGU; 2003. 317 p.
39. Kvenvolden K.A. Gas hydrates: Geological perspective and global change. *Rev. Geophys.* 1993;31:173–187.
40. Golytsin G.S., Ginsburg A.S. Estimation of possible abrupt methane warming 55 mln years in the past. *Doklady Academy of Sciences*. 2007;413(6). (In Russ.).
41. Chappellaz J., Blunier T., Raynaud D., Barnola J.M., Schwander J., Stauffer B. Synchronous changes in atmospheric CH<sub>4</sub> and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature*. 1993;336:443–445.
42. Etheridge D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R.L. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1998;103(D13):15979–15993.
43. Sapart C.J., Monteil G., Prokopiou M., van de Wal R.S.W., Kaplan J.O., Sperlich P. et al. Natural and anthropogenic variations in methane sources during the past two millennia. *Nature*. 2012;490(7418):85–89.
44. Rasmussen R.A., Khalil M.A.K. Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends and interhemispheric gradient. *J. Geophys. Res.* 1984;89(D7):11599–11605.
45. Chappellaz J. et al. Changes in atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during Holocene. *J. Geophys. Res.* 1997;102(D13):15987–15997.
46. Dallenbach A., Blunier T., Fluckiger J., Stauffer B. Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene. *Geophys. Res. Lett.* 2000;27(7):1005–1008.
47. Cuffey K.M., Clow G.D., Alley R.B., Stuiver M., Waddington E.D., Saltus R.W. Large Arctic Temperature Change at the Wisconsin-Holocene Glacial Transition. *Science*. 1995;270:455–458.
48. Romanovskii N.N., Gavrilov A.V., Tumskey V.E. Lake thermokarst and its role in formation of the coastal zone of the Laptev Sea shelf. *Earth Cryosphere*. 1999;3(3):79–91. (In Russ.).
49. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas. *Geo-Marine Letters*. 2005;25(2):167–182.
50. Feely R.A., Sabine C.L., Takahashi T., Wanninkhof R. Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: the Global CO<sub>2</sub> Survey. *Oceanography*. 2001;14(4):18–32.
51. Takahashi T., Sutherland S.C., Sweeney C., Poisson A., Metzl N., Tillbrook B., Bates N., Wanninkhof R., Feely R.A., Sabine C., Olafsson J., Nojiri Y. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res.* 2002;2(49):1601–1622.
52. Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle. *Geophysical Research Letters*. 2005;32(9).
53. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*. 2014;7(1):64–70.
54. Wild B., Shakhova N., Dudarev O., Semiletov I. et al. Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea. *Nature Communications*. 2022;13. 5057. DOI: 10.1038/s41467-022-32696-0.

55. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I., Jansen J., Szidat S., Kosmach D., Dudarev O., van der Veen C., Egger M., Sergienko V., Salyuk A., Tumskey V., Tison J.L., Rockmann T. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis. *Biogeosciences*. 2017;14(9): 2283–2292.
56. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2052). 20140451.
57. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*. 2017;8(1). 15872.
58. Romankevich E.A. Geochemistry of organic matter in the ocean. Moscow: Nauka Press; 1977. 256 p. (In Russ.).
59. Romankevich E.A., Vetrov A.A. Carbon cycle in the Russian arctic seas. Moscow: Nauka Press; 2001. 302 p. (In Russ.).
60. Romankevich E.A., Vetrov A.A. Carbon in the World Ocean. Moscow: GEOS; 2021. 352 p. ISBN978-5-89118-835-8. DOI 10.34756/GEOS.2021.16.37857.
61. Gramberg I.S. et al. (eds.). Arctic on the threshold of the third millennium. Sankt Petersburg: Nauka Press; 2000. 247 p. (In Russ.).
62. Stein R., Macdonald R.W. (eds.). The organic carbon cycle in the Arctic ocean, Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag; 2003. 363 p.
63. Bordovsky O.K., Semiletov I.P. Carbon exchange between the bottom water and sediments in the Sea of Okhotsk. *Doklady AN SSSR*. 1989;306(3):697–700. (In Russ.).
64. Pipko I., Semiletov I., Tishchenko P., Pugach S., Christensen J. Carbonate Chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea. *Progress in Oceanography*. 2002;55:77–94.
65. Pipko I.I., Pugach S.P., Semiletov I.P., Anderson L.G., Shakhova N.E., Gustafsson Ö., Repina I.A., Spivak E.A., Charkin A.N., Salyuk A.N., Shcherbakova K.P., Panova E.V., Dudarev O.V. The dynamics of the carbon dioxide system in the outer shelf and slope of the Eurasian Arctic Ocean. *Ocean Sci*. 2017;13:997–1016.
66. Pipko I.I., Semiletov I.P., Pugach S.P. On the carbonate system of the East Siberian Sea. *Doklady Akademii Nauk*. 2005;402(3):398–401. (In Russ.).
67. Semiletov I.P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters. *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci*. 1999;368:679–682.
68. Semiletov I.P., Makshtas A.P., Akasofu S., Andreas E. Atmospheric CO<sub>2</sub> balance: The role of Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*. 2004;1(5). L05121. DOI: 10.1029/2003GL017996.
69. Bates N. Marine Carbon Cycle Feedbacks. In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol (eds.). Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme August; 2009. P. 55–68. ISBN: 978-2-88085-305-1.
70. Semiletov I., Dudarev O., Luchin V., Charkin A., Shin K., Tanaka N. The East-Siberian Sea as a transition zone between the Pacific origin water and local shelf water. *Geophysical Research Letters*. 2005;32. L10614. DOI: 10.1029/2005GL022490.
71. Rusanov I.I., Savvichev A.S., Zasko D.N., Sigalevich P.A., Pipko I.I., Pugach S.P., Pimenov N.V., Semiletov I.P. Primary production and microbial heterotrophy in the Siberian arctic seas, Bering Strait, and Gulf of Anadyr, Bering Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2024;299. 108673.
72. Semiletov I., Pipko I., Repina I., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *Journal of Marine Systems*. 2007;66:204–226.
73. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Charkin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N. Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening. *Nature Geoscience*. 2016;9:361–365. DOI: 10.1038/NGEO2695.
74. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson Ö. et al. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011). *Ocean Sci*. 2018;14(1):87–103.
75. Macdonald R.W., Anderson L.G., Christensen J.P., Miller L.A., Semiletov I.P., Stein R. The Arctic Ocean: budgets and fluxes. In: K.-K. Liu, L. Atkinson, R. Quinones, L. Talaue-McManus (eds.). Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis. Springer-Verlag; 2008. P. 291–303.

76. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., Nishino S. Space-time dynamics of carbon stocks and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea. *Biogeosciences*. 2013;10:5977–5996. DOI: 10.5194/bg-10-5977-2013.
77. Belzil C., Roesler C.S., Christensen J.P., Shakhova N., Semiletov I. Fluorescence measured using the WETStar DOM fluorometer as a proxy for dissolved matter absorption. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2006;67:441–449.
78. Kaitin S., Anderson L.G. Uptake of atmospheric carbon dioxide in Arctic shelf seas: evaluation of the relative importance of processes that influence pCO<sub>2</sub> in water transported over the Bering-Chukchi Sea shelf. *Mar. Chem.* 2005;94:67–79.
79. Gosink T.A., Pearson J.G., Kelley J.J. Gas movement through sea ice. *Nature*. 1976;263:41–42.
80. Kelley J.J., Gosink T.A. Gases in Sea Ice. Final Report: Contract N000 14-76C-0331, Institute of Marine Science, University of Alaska, Fairbanks, Alaska; 1979. 107 p.
81. Semiletov I.P. On seasonal variability of hydrocarbon gases and dissolved oxygen in the Uglovoe Bay, the Japan Sea Proc. *Far-Eastern Hydrometeorological Institute*. 1987;131:80–84. (In Russ.).
82. Alling V., Sanchez-Garcia L., Porcelli D., Pugach S., Vonk J., van Dongen B., Mörrh C.M., Anderson L.G., Sokolov A., Andersson P., Humborg C., Semiletov I., Gustafsson Ö. Non-conservative behavior of dissolved organic carbon across the Laptev and East Siberian seas. *Global Biogeochemical Cycles*. 2010;24. GB4033.
83. Vonk J.E., Sánchez-García L., van Dongen B.E., Alling V., Kosmach D., Charkin A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Shakhova N., Roos P., Eglinton T.I., Andersson A., Gustafsson Ö. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*. 2012;489(7414):137–140.
84. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., Gustafsson Ö. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*. 2011;8:2407–2426.
85. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O., Ingri J., Anderson P., Dudarev O., White D., Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial carbon export. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004;18. GB1036. DOI: 10.1029/2003 GBO 02087.
86. Vetrov A.A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Peresipkin V.I., Charkin A.N. Study of composition and origin of organic matter in the East-Siberian Sea bottom sediments. *Geokhimiya (Geochemistry)*. 2008;3:183–195. (Translated in English).
87. Pipko I.I., Semiletov I.P., Tischenko P. Ya., Pugach S.P., Savelieva N.I. Carbon System Parameters Variability in the East-Siberian Sea Coastal-Shelf Zone during Fall Season. *Okeanologiya (Oceanology)*. 2008;48(1):59–72. (Translated in English).
88. Pipko I.I., Semiletov I.P., Pugach S.P., Wählström I., Anderson L.G. Interannual variability of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and carbon system in the East Siberian Sea. *Biogeosciences*. 2011;8:1987–2007. DOI: 10.5194/bg-8-1987-2011.
89. Anderson L.G., Jutterström S., Hjalmarsson S., Wahlström I., Semiletov I.P. Out-gassing of CO<sub>2</sub> from Siberian Shelf seas by terrestrial organic matter decomposition. *Geophysical Research Letters*. 2009;36. L20601. DOI: 10.1029/2009GL040046.
90. Semiletov I.P., Pipko I.I. Sinks and sources of carbon dioxide in the Arctic Ocean. *Transactions of Russian Academy of Sciences*. 2007;414(3). (Translated in English by Springer).
91. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf. *Journal of Marine Systems*. 2007;66(1/4):227–243.
92. Savvichev A.S., Rusanov I.I., Pimenov N.V., Zakharova E.E., Veslopolova E.F., Lein A.Y., Crane K., Ivanov M.V. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Chukchi Sea. *Microbiology*. 2007;76:603–613. DOI: 10.1134/S0026261707050141.
93. Namsaraev B.B., Rusanov I.I., Mitskevich I.N., Veslopolova E.F., Bolshakov A.M., Egorov A.V. Bacterial methane oxidation rates in waters and sediments of the Kara Sea and the Yenisey River estuary. Supplement to: Namsaraev B.B. et al. Bacterial oxidation of methane in the Yenisey River estuary and the Kara Sea. *Oceanology*. 1995;35(1):80–85. (PANGAEA; 1995).
94. Are F.E. The problem of the emission of deep-buried gases to the atmosphere. In: Paeppe R., Melnikov V.P., van Overloop E., Gorokhov V.D. (eds.). Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2001. P. 497–509.

95. Zubov N.N. Sea waters and ice. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1938. 454 p. (In Russ.).
96. Reeburg W.S. Oceanic methane biogeochemistry. *Chem. Rev.* 2007;107:486–513.
97. Shakhova N.E., Nicolsky D., Semiletov I.P. On the current state of sub-sea permafrost in the East-Siberian Shelf testing of modeling results by observational data. *Transactions of Russian Academy of Sciences.* 2009;429(5). (Translated in English by Springer).
98. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Characteristical features of carbon cycle in the shallow shelf of the eastern sector of Russian Arctic. In: N.P. Laverov et al. (eds.). *Environmental and Climate Changes and catastrophes.* Moscow: A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences; 2008. Vol. 4. P. 167–181.
99. Steinbach J., Holmstrand H., Scherbakova K., Kosmach D., Bruchrt V., Shakhova N., Salyuk A., Sapart C., Chernikh D., Noormets R., Semiletov I., Gustafsson O. Source Apportionment of Methane Escaping the Subsea Permafrost System in the Outer Eurasian Arctic Shelf. *Proceedings National Academy of Sciences (PNAS).* 2021;118(10). DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
100. Savelieva N.I., Semiletov I.P., Vasilevskaya L.N., Pugach S.P. A climate shift in seasonal values of meteorological and hydrological parameters for Northeastern Asia. *Progress in Oceanography.* 2000;47(2/4):279–297.
101. Semiletov I.P., Savelieva N.I., Weller G.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Gukov A. Yu., Vasilevskaya L.N. The Dispersion of Siberian River Flows into Coastal Waters: Meteorological, Hydrological and Hydrochemical Aspects. In: *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean, NATO Meeting / NATO ASI Series.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2000. P. 323–367.
102. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science.* 2005;308(5727):1429.
103. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., Voropaev Yu. V., Prosyannikov S.F., Wong C.S., Chan Y.-H. Wintertime CO<sub>2</sub> emission from soils of Northeastern Siberia. *Arctic.* 1993;46:197–204.
104. Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas-hydrates – A potential energy source for the 21st Century. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2007;56(1):14–31.
105. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Modern state of the role of the East Siberian Shelf in the methane cycle. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2009;79(6):507–518.
106. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Seismotectonics of Yakutia. Moscow: GEOS; 2000. (In Russ.).
107. Hope C., Schaefer K. Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Climate Change.* 2015;6:56–59. DOI: 10.1038/nclimate2807.
108. Whitman G., Hope C., Wadhams P. Climate science: Vast costs of Arctic change. *Nature.* 2013;449:401–403.
109. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., Treharne R., Duffy P.B., Pomerance R. et al. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2021;118(21). e2100163118.
110. Barnard P.E., Moomaw W.R., Fioramonti L., Laurance W.F., Mahmoud M.I., O'Sullivan J., Rapley C.G., Rees W.E., Rhodes C.J., Ripple W.J., Semiletov I.P., Talberth J., Tucker C., Wysham D., Ziervogel G. World Scientists' Warnings Into Action. *Local to Global. Science Progress.* 2021;104(4):1–32.