

## Тезисы доклада

### Климатический и экологический мониторинг арктических и субарктических морей России (1994-2024гг): проблемы и избранные результаты

чл.-корр. РАН, д.г.н. **И.П. Семилетов** (Лаборатория арктических исследований-ЛАИ, ТОИ ДВО РАН) **-докладчик**, академик РАН, д.ф.-м.н. Л.И. Лобковский (Сейсмотектоническая группа ИОРАН), д.г.м.н. О.В. Дударев, д.г.м.н. А.В. Кошурников, к.ф.-м.н. А.А. Крылов, к.б.н. Е.М. Латковская, к.г.н. И.И. Пипко, к.г.н. С.П. Пугач, д.г.м.н. Н.Е. Шахова, к.т.н. Д.В. Черных (ЛАИ ТОИ ДВО РАН, ИОРАН, МГУ, СахГУ, ТГУ, ТПУ)

В настоящее время развитие мировой климатологии испытывает трудности, обусловленные, в первую очередь, недостатком знаний о степени влияния антропогенных и естественных факторов на изменение климата, что приводит к большому количеству неопределенностей в функционировании климатической системы нашей планеты и вызывает ряд серьезных проблем, связанных с планированием развития в области энергетики. Актуальность наших исследований обусловлена фундаментальной проблемой- оценкой биогеохимических, геологических, климатических, и экологических последствий деградации наземной и подводной мерзлоты в контексте: 1) транспорта и трансформации наземного органического вещества (ОВ), включая окисление до двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), 2) дестабилизации арктических шельфовых гидратов и массивированного выброса метана ( $\text{CH}_4$ ) в атмосфере.

**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, эти компоненты являются наиболее подвижным звеном в круговороте углерода, являясь продуктами 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.

Изменения, связанные с мобилизацией гигантских запасов древнего ОВ,  $\text{CH}_4$  и других природных углеводородов, прежде надежно законсервированные в многолетних мерзлых толщах (далее- *мерзлота*), представляют собой новую, ранее неизвестную мировому научному сообществу, обратную связь, обусловленную деградацией наземной и подводной мерзлоты, последствия которой трудно предсказать. Согласно результатам моделирования, в ответ на потепление в Арктическом регионе ожидается сокращение площади наземной мерзлоты в два раза к 2090 г (АСIA 2004). Великие Сибирские реки рассматриваются докладчиками как интеграторы геохимических сигналов в их гигантских водосборах, которые переносятся в арктические и субарктические моря в виде растворенного и взвешенного органического вещества (Semiletov et al., 2011, 2012; Dudarev et al., 2022). В конце 1990х впервые было показано, что последствия деградации берегового ледового комплекса оказывают определяющее влияние на биогеохимический режим мелководного шельфа морей Восточной Арктики (МВА) и осадконакопление (Semiletov, 1999a,b). Кроме наземной мерзлоты, цикл углерода на Российском Арктическом шельфе находится под влиянием изменений, происходящих в состоянии подводной мерзлоты, доля которой только на Восточно-Сибирском шельфе составляет >80% от всей подводной мерзлоты Мирового океана, и около 90% акватории Северного морского пути

(СМП). Поскольку обратные связи, определяющие центральную роль Арктики в климатической системе планеты, обусловлены, в первую очередь, взаимодействием между гидрологическим циклом и циклом углерода, изучение динамики и взаимосвязи отдельных компонентов этих циклов между собой, а также количественная оценка происходящих изменений, является ключевой задачей для разработки репрезентативных биогеохимических и климатических моделей.

Для изучения биогеохимических, экологических, геологических и климатических последствий *используется комплекс методов*, включающий гидрохимические, изотопные, молекулярные методы анализа растворенного и взвешенного состава ОВ, биогенных элементов, растворенного кислорода и  $\text{CH}_4$ , параметров карбонатной системы, иловых вод и донных ОВ, микрометеорологические и камерно-динамические (на плавучих поплавках, поверхности льда, почвы) методы для количественной оценки потоков основных парниковых газов: двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) и  $\text{CH}_4$ , включая климатический мониторинг приводного слоя атмосферы, водной толщи в ключевых районах МВА, и поверхностной воды по маршруту движения научно-исследовательского судна (НИС). Для выявления генезиса ОВ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  используются изотопы С (С-13, С-14), О (О-16, О-18), и Н (протий/дейтерий). Для исследования генезиса геологического флюида используется набор геофизических и геологических методов (электромагнитное профилирование и сейсмопрофилирование, отбор кернов осадков, научное бурение до 58 метров в глубину осадка, и т.д.). а также состав редкоземельных и тяжелых металлов, характерные особенности минералогического состава. Для количественной оценки потоков пузырькового  $\text{CH}_4$  разработаны и внедрены различные гидроакустические методы (Chernykh et al., 2023; Leifer et al., 2017; Shakhova et al., 2015), которые получили высокую оценку мирового сообщества. Для измерения содержания растворенного  $\text{CH}_4$  используются различные модификации парофазного газохроматографического анализа, разработанные и внедренные в практику морских исследований в РФ одним из авторов доклада (Семилетов, 1992), и позднее модифицированные для анализа состава воздушных включений ледяных кернов со станции Восток -совместно с ААНИИ и Горным институтом (Semiletov, 1993, 1989). Особое внимание уделяется оценке продуктивности вод, что наряду с набором ключевых параметров (хлорофилл, концентрация и видовой состав фитопланктона, CDOM, и др.) дает возможность репрезентативного спутникового мониторинга продуктивности вод – ключевого параметра для независимой оценки потоков  $\text{CO}_2$  в системе атмосфера-океан (Rusanov et al., 2024; Pipko et al., 2017; Semiletov et al., 2013; Pugach et al., 2017). Соответствие использованных методов мировому уровню представлено в более 300 статей, некоторые из которых представлены ниже в списке основных публикаций.

В МВА доказано существование гетеротрофной и автотрофной биогеохимических провинций, которые характеризуются эмиссией  $\text{CO}_2$  и поглощением атмосферного  $\text{CO}_2$ , соответственно (Semiletov et al., 2005, 2007, 2016; Pipko et al., 2011, 2017). Выполнены первые оценки поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$  в американском секторе Чукотского моря (Pipko et al., 2002). Оценена количественно роль речного фактора и окисления эрозионного ОВ в динамике карбонатной системы и потокам  $\text{CO}_2$  в системе атмосфера-океан (Semiletov et al., 2016). Выполнены первые количественные оценки потока атмосферного  $\text{CO}_2$  через лед и снежницы в Чукотском море, а также доказано раннее наступление фотосинтеза подо льдом до начала полярного рассвета, что необходимо учитывать для расчета регионального баланса  $\text{CO}_2$  (Semiletov et al., 2004). На основе многолетних исследований начатых авторами в конце 1990х, тысяч измерений изотопного и молекулярного состава ОВ донных осадков, выполнены первые количественные расчеты

транспорта и генезиса наземного ОВ в системе суша-шельф во всем Северном Ледовитом океане (Семилетов, 1999; Guo et al., 2004, Martens et al., 2023).

До последнего времени существовало мнение, что арктические морские гидраты сохраняют стабильность за счет существования крышки сплошной подводной мерзлоты, что исключало разгрузку  $\text{CH}_4$  гидратов в водную толщу-атмосферу (Romanovskii et al., 2000, 2005; IPCC, 2014). Однако, после публикации ряда наших результатов, в которых была документирована несплошность подводной мерзлоты в МВА, что привело к формированию аномальных полей растворенного  $\text{CH}_4$ , (Шахова и др., 2005, 2007абв, 2009аб; Shakhova et al., 2010ab), стало понятным, что наилучшим кандидатом для объяснения массивированного выброса пузырькового  $\text{CH}_4$  (Shakhova et al., 2014, 2015, 2017; Leifer et al., 2017) является дестабилизация мелкозалегающих арктических гидратов. На основе многолетних комплексных исследований было показано, что консервативная статистически обоснованная оценка эмиссии из МВА в 2-3 раза превышает эмиссию  $\text{CH}_4$  из всего Мирового океана (Shakhova et al., 2010, 2014, 2019). Подводная мерзлота в последние 30 лет деградирует с удвоенной скоростью, по сравнению со скоростями в предшествующие десятилетия, в результате чего древний органический углерод и метан ( $\text{CH}_4$ ) поступают в возрастающих количествах в водную толщу; причем величины потоков  $\text{CH}_4$  определяются состоянием подводной мерзлоты (Shakhova et al., 2015, 2017, 2019). Особое внимание было уделено исследованию термодинамических свойств донных осадков МВА и Карского моря, что крайне необходимо для моделирования процессов деградации подводной мерзлоты и дестабилизации гидратов МВА и Карского моря. На основе этих данных была построена карта-схема распределения температуры донных осадков и мерзлоты на арктическом шельфе (Bukhanov et al., 2023). Карта кровли подводной мерзлоты уточняется на основе модифицированного метода электромагнитного зондирования с валидацией по данным бурения (Кошурников и др., 2015; Alexeev et al., 2024, in preparation). Совместно с гидратной группой СколТех исследовано влияние термического и солевого режима обменных процессов в системе вода-донные отложения на нарушение фазового равновесия гидрат-газ. Показано, что значительная часть исследуемой акватории МВА подстилается мерзлотой с кровлей заглубленной в слой стабильности гидратов, что является необходимым условием дестабилизации гидратов и массивированной разгрузки пузырькового метана в водную толщу-атмосферу. В ближайшее время будет выполнена инвентаризация данных полученных в десятках морских авторских экспедиций и представлена новая количественная top-down оценка эмиссии  $\text{CH}_4$  из МВА, которая будет сравнена с независимыми количественными оценками bottom-up. Результаты сравнения будут использованы для верификации модели подводной мерзлоты нового поколения.

**Глобальный вызов:** эффективность «легких» планеты: лесов Сибири и Амазонии в последнее время оценивается близкой к «нулевой». Начинается переоценка роли высокопродуктивных районов Мирового океана в поглощении атмосферного  $\text{CO}_2$ . В этом контексте, на научно-технологической основе [кампуса мирового уровня СахалинTech](#) предлагается межрегиональная Программа комплексных исследований направленная на формирование лидерской роли России в пересмотре и количественной оценке роли обширных морских и наземных экосистем Сибири и Дальневосточного региона в балансе основных парниковых газов в региональном и планетарном масштабе. Особое внимание уделяется оценке роли Охотского моря и автотрофных провинций акватории СМП в поглощении атмосферного  $\text{CO}_2$

**Резюме Эмиссия парниковых газов:**  $\text{CO}_2$  - вследствие окисления эрозийного углерода (Semiletov et al., Nature Geoscience, 2016; Pipko et al., Biogeosciences, 2011, Ocean Sciences, 2017), и  $\text{CH}_4$ - вследствие расконсервирования депозитов природных углеводородов

(Shakhova et al., Science, 2010), может приобрести широкомасштабный характер и вызвать необратимые климатические изменения (Beer, Nature, 2008; Heimann & Reichstein, Science, 2008). **Россия может занять мировое лидерство в этом направлении**, при условии поддержки исследований на федеральном уровне. Достижимость этой цели иллюстрируется публикацией ключевых результатов в мировых топ-журналах, включая Science (2), Nature (1), Nature Geoscience (3), Nature Communications (7), Science Advances (2), Global Biogeochemical Cycles (7), PNAS (2), Biogeosciences (14), Geophysical Research Letters (4), J. Geophysical Research (5), Environment Research Letters (3), J. Marine Sciences (2), Climate in Past (2), Progress in Oceanography (4).

### **Избранные публикации**

- 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. (2016). Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience*, vol. 9, 361-365, doi: 10.1038/NGEO2695.
- Semiletov, I.P.(1999a), On aquatic sources and sinks of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the Polar Regions // *J. Atmos. Sci.*, 56, 286-306.
- Shakhova N., I. Semiletov, O. Gustafsson, V. Sergienko, L. Lobkovsky, O. Dudarev, V. Tumskoy, M. Grigoriev, A. Mazurov, A. Salyuk, R. Ananiev, A. Koshurnikov, D. Kosmach, A. Charkin, N. Dmitrevsky, V. Karnaukh, A. Gunar, A. Meluzov and Chernykh D.(2017). Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications*, 8,15872, DOI: 10.1038/ncomms15872.
- Shakhova, N., I. Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernikh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskoy, O. Gustafsson (2014), Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geosciences*, vol. 7, No. 1, doi: 10.1038/NG
- Tesi, T., Semiletov, I., Hugelius, G., Dudarev, O., Kuhry, P., Gustafsson O., 2014. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 133, 235-256.
- Semiletov I.P., Shakhova N. E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., and S. Nishino (2013), Space-time dynamics of carbon stocks and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea, *Biogeosciences*, 10, 5977-5996; doi:10.5194/bg-10-5977-2013
- Semiletov I.P., Shakhova N. E., Sergienko V.I., Pipko I.I., and O. Dudarev (2012). On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System, *Environment Research Letters*, 7, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015201
- Shakhova N., and I. Semiletov (2012). Trace gas emissions from sub-sea permafrost. In: *Climate Change and the Cryosphere: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): An Arctic Council "Cryosphere Project" in Cooperation with IASC, CliC and IPY, AMAP, Oslo, Norway*, 97-104.
- Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., and Ö. Gustafsson (2011). 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*, 8, 2407-2426.
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., and O. Gustafsson (2010). Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf// *Science*, 327, 1246-1250
- Shakhova N.E., and I.P. Semiletov, (2009). Methane Hydrate Feedbacks, In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol, eds., *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications*, Published by WWF

International Arctic Programme August, 2009, ISBN: 978-2-88085-305-1, p. 81-92.

- Semiletov I.P., and Ö. Gustafsson, (2009). East Siberian Shelf Study Alleviates Scarcity of Observations. *Eos, Transactions, AGU*, vol. 90, number 17, 28 April 2009, p. 145-146.
- Semiletov, I., I.I. Pipko, I.A. Repina, and N. Shakhova, (2007), 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*, 66 (1-4), 204-226.
- Shakhova, N. and I. Semiletov, 2007, Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf, *Journal of Marine Systems*, 66 (1-4), 227-243.
- Semiletov, I., O. Dudarev, V. Luchin, K.-H. Shin, and N. Tanaka (2005), The East-Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters// *Geophysical Research Letters*, 32, L10614/2005GL022490.
- Shakhova, N., I. Semiletov, and G. Panteleev (2005), The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle, *Geophysical Research Letters*, 32, L09601, doi:10.1029/2005GL022751
- Semiletov, I., A. Makshtas, S.-I. Akasofu, and E.L. Andreas (2004), Atmospheric CO<sub>2</sub> balance: the role of Arctic sea ice // *Geophysical Research Letters*, 31, L05121, doi: 10.1029/2003GL017996.
- Semiletov, I., N. Shakhova, and V. Romanovsky, (2004), Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf System, *World Resource Review*, 16 (4), 503-541
- Guo, L., I. Semiletov, O. Gustafsson, J. Ingri, P. Anderson, O. Dudarev, and D. White, 2004, Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial carbon export. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB 1036, doi: 10 1029/2003 GBO 02087
- Semiletov, I.P., (1999), Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci.*, 368, 679-682 (translated into English).
- Martens, J., Wild, B., Semiletov, I., Dudarev, O., and Ö. Gustafsson, (2022). Circum-Arctic release of terrestrial carbon varies between regions and sources. *Nature Communications*, vol. 13, no.5858
- Luchin, V.A., I.P. Semiletov, and G.E. Weller, 2002, Changes in the Bering Sea region: atmosphere–ice–water system in the second half of the twentieth century, *Progress in Oceanography*, 55 (1-2), 23-44.
- Pipko, I.I., I.P. Semiletov, P.Ya. Tishchenko, S.P. Pugach, and J.P. Christensen, 2002. Carbonate chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea, *Progress in Oceanography*, 55, 77–94.
- Savelieva, N.I., I.P. Semiletov, L.N. Vasilevskaya., and S.P. Pugach, 2000, A climate shift in seasonal values of meteorological and hydrological parameters for Northeastern Asia, *Progress in Oceanography*, 47 (2-4), 279-297.
- Semiletov I.P. I.I. Pipko, N.Ya Pivovarov, V.V. Popov, S.A. Zimov, Yu.V. Voropaev, and S.P. Daviodov, (1996), Atmospheric carbon emissions from northern lakes: a factor of global significance, *Atmospheric. Environment*, 30, 1657-1671.
- Zimov, S.A., Yu V. Voropaev, I.P. Semiletov, S.P. Daviodov, F.S. Chapin, and S. Trumbore, 1997, North Siberian Lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon. *Science*, 277, 800-802.
- Semiletov I.P., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Daviodov S.P., Barkov N.I., Gusev A.M., Lipenkov V.Ya. (1994) Atmospheric Methane in past and present. *Trans. (Doklady) Russ. Acad. Sci.* v. 339, n 2, p.253-256.

- Zimov, S.A., I.P. Semiletov, S.P. Daviodov, Yu.V. Voropaev, S.F. Prosyannikov, C.S. Wong, and Y.-H. Chan, 1993, Wintertime CO<sub>2</sub> emission from soils of Northeastern Siberia. *Arctic*, 46, 197-204.
- Semiletov I.P., A.Yu. Gusev. N.I. Barkov, N.V. Pozdnyakov, and V.A. Lipenkov (1989). Paleovariations of air CO<sub>2</sub> in the Antarctic ice cores. *Trans. (Doklady) Russian Acad. Sci.*, v.309, 1, 196-199.
- Vonk, J.E., Semiletov, I.P., Dudarev, O.V., Eglington, T.I., Andersson, A., Shakhova, N., Charkin, A., Heim, B., Gustafsson, O., 2014. Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian –Arctic shelf waters. *J. Geophysical Research*, 119, doi: 10.1002/2014JC010261.
- 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., Eglington T. I., Andersson A., Gustafsson Ö. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 2012, v.489 (7414), p.137 — 140.

#### Избранные монографии и главы в книгах

- Семилетов И.П. (1992), Определение содержания общего неорганического углерода методом парофазного газохроматографического анализа. Глава: *Современные методы гидрохимических исследований океана* / Под Ред. О.К. Бордовского и В.Н. Иваненкова, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российская академия наук, Москва, 94-106.
- Семилетов И.П. (1993), Цикл углерода и глобальные изменения в последнем климатическом цикле. *Материалы гляциологических исследований (Data of Glaciological Studies)*, 31, Москва, Издательство “Наука”, 64-84.
- Semiletov, I.P.(1993), Ancient Ice Air Content of the Vostok Ice Core. In: *Biogeochemistry of Trace Gases*, S. Oremland (ed.), Chapman and Hall Inc., New York, 46-59.
- Semiletov, I.P., S.A. Zimov, S.P. Daviodov, Yu.V. Voropaev, and S.F. Prosyannikov, 1993, Arctic Atmospheric CO<sub>2</sub> Bimodal Distribution, In T.S. Vinson and T.P. Kolchugina (eds.), *Proc. of the International Workshop on Carbon Cycling in Boreal Forest and Sub-Arctic Ecosystems: Corvallis, OSU, Oregon, September 1991*, 35-41.
- Semiletov I.P, I.I. Pipko, N.Ya. Pivovarov, A. Yu. Gukov, S.A. Zimov, and S.P. Daviodov, (1994). On the flux of methane and carbon dioxide from aquatic ecosystems of the Northern Asia to the atmosphere. In: *Bridges of Science Between North America and the Russian Far East*, R.H. Meehan, V. Sergienko, and G. Weller (eds), Proc. 45<sup>th</sup> Arctic Science Conference, Vladivostok 1994, 140-148.
- Семилетов И.П. (1995), Цикл углерода и глобальные изменения в прошлом и настоящем, Глава : *Химия морей и океанов* / Под ред. О.К. Бордовского, Москва, Издательство “Наука”, 130-154.
- Semiletov I.P., N.I. Savelieva, G.E. Weller, I.I. Pipko, S.P. Pugach, A.Yu Gukov, and L.N. Vasilevskaya, (2000), 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, E.L. Lewis (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 323-367.
- Семилетов И.П., Дударев О.В., Пипко И.И., Пугач С.П. , Сергиенко В.И. , Чубик П.С. , Мазуров А.К. , и Н.Е. Шахова (2017), *Цикл углерода в морях Восточной Арктики на рубеже XX–XXI веков. Книга 1. Транспорт и трансформация углерода в системе «суша–шельф»* / Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 545 с.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Сергиенко В.И. (2018), *Цикл углерода в морях Восточной Арктики на рубеже XX–XXI веков. Книга 2. Метан: результаты первых исследований (1994-2010гг.)* / Владивосток: Дальнаука, 2018. – 240