

Дестабилизация реликтовых метангидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата

М. М. Аржанов¹ кандидат физико-математических наук
ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

И. И. Мохов², академик РАН
ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

С. Н. Денисов³, кандидат физико-математических наук
ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Проведены расчеты термического состояния грунтов полуострова Ямал и сопредельных регионов для последних 90 тыс. лет. Согласно полученным результатам при климатических условиях максимума оледенения около 90 тыс. лет назад глубина верхней границы зоны стабильности метангидратов в этом регионе могла достигать поверхности. Получены оценки влияния современных климатических изменений на прочность мерзлых пород и устойчивость реликтовых метангидратов полуострова Ямал. Формирование воронок после газовых выбросов на Ямале может быть связано с дестабилизацией реликтовых метангидратов в результате повышения приповерхностной температуры в последние годы.

Ключевые слова: изменения климата, вечная мерзлота, реликтовые газовые гидраты, ледниковые периоды.

Общий рост приповерхностной температуры, наиболее значительный в высоких и средних широтах Северного полушария, может усилиться в XXI в. и в последующие несколько столетий [14; 17]. Согласно данным наблюдений и результатам моделирования пространственная структура отклика температуры многолетнемерзлых пород (ММП) на приповерхностное потепление имеет региональные максимумы, в частности на севере Западной Сибири [4; 18]. Максимальное увеличение глубины активного слоя в XXI в. по расчетам с глобальными климатическими моделями также характерно для этого региона [3]. Повышение температуры грунта снижает прочность многолетнемерзлых пород и оказывает влияние на состояние реликтовых метангидратов (МГ), находящихся выше современной границы зоны стабильности.

Дестабилизация реликтовых МГ, находящихся вблизи поверхности, может быть одной из причин

газовых выбросов в атмосферу [21]. В 2014 г. в юго-западной части полуострова Ямал (70,5° с. ш., 68° в. д.) была обнаружена воронка диаметром 15 м со следами выброшенной породы [10], а затем еще несколько подобных объектов в разных районах Западной Сибири [7; 11]. Свидетельством того, что был выброс газа в атмосферу, является отсутствие следов внешнего воздействия и горения, а также повышенная концентрация метана в воронке [6; 11; 12].

Выбросы газа в данном регионе не связаны с поступлением газа из нижележащих слоев литосферы, поскольку согласно данным изотопного анализа газ, отобранный из отложений до глубин около 120 м на Ямале, содержит азот, имеет биохимическое происхождение и образован в результате микробной переработки содержащегося в породах органического вещества [26]. Большие потоки газа, а также состав, строение и свойства мерзлых пород в регионе Ямала указывают на возможность существования газовых скоплений в гидратной форме [26]. Небольшие глубины залегания выше границы зоны стабильности могут свидетельствовать, что газовые выбросы могут быть следствием диссоциации реликтовых МГ [27].

¹ e-mail: arzhanov@ifaran.ru.

² e-mail: mokhov@ifaran.ru.

³ e-mail: denisov@ifaran.ru.

Формирование гидратов в пределах криолитозоны вблизи поверхности грунта происходит в водонасыщенных породах при достижении определенных термобарических условий, которые могут создаваться под действием внешней нагрузки, например вышележащим ледниковым щитом [15; 16; 24]. После исчезновения ледникового щита возможна консервация сформировавшихся гидратов [26]. Согласно результатам палеореконокструкций около 90 тыс. лет назад полуостров Ямал и большая часть полуострова Таймыр находились под ледниковым щитом [32; 33]. Для оценки термобарических условий в грунте, создаваемых ледниковым щитом, использовались данные о пространственном положении границ [32] и толщине ледникового щита [33; 34] в Западной Сибири. В проведенных расчетах температура основания ледникового щита, оцененная на основе [31], не превышала -2°C . Геотермальный поток задавался с использованием данных [30]. Оценки давления у основания ледникового щита представлены на рис. 1. Согласно экспериментальным данным [9] при давлении выше 2,5 МПа метангидраты могут находиться в стабильном состоянии при температурах выше 0°C .

Результаты расчетов показывают, что при климатических условиях оледенения около 90 тыс. лет назад глубина верхней границы зоны стабильности гидратов газов могла достигать поверхности (см. рис. 1).

Начавшееся более 10 тыс. лет назад потепление с максимумом около 6 тыс. лет назад (оптимум голоцена) могло привести к диссоциации газовых гидратов, находящихся вблизи поверхности. Для оценки климатических условий на Ямале в оптимуме голоцена были проанализированы результаты расчетов приповерхностной температуры с использованием ансамбля глобальных климатических моделей в рамках международного проекта PMIP3 — Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III (<https://rmip3.lscce.ipsl.fr>). Для современного периода использовались результаты расчетов с ансамблем климатических моделей в рамках международного проекта CMIP5 (<https://pcmdi.llnl.gov/search/cmip5>) для 1850—2005 гг. со сценарием Historical и для периода 2006—2100 гг. со сценарием умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5. В том числе анализировались результаты расчетов с шестью глобальными климатическими моделями: CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MRI-CGCM3. Проведено сравнение приповерхностной температуры на Ямале для периода

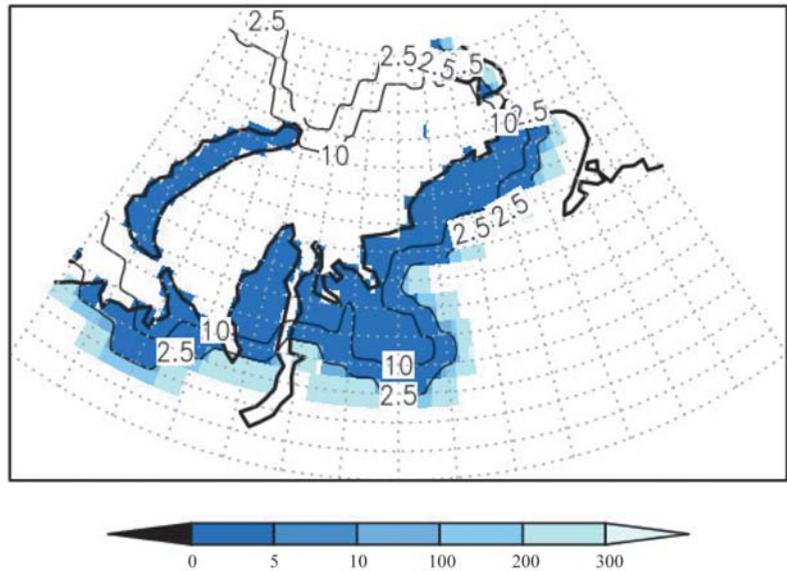


Рис. 1. Глубина (в м) верхней границы зоны стабильности метангидратов под ледниковым щитом (обозначена цветом) и давление у основания ледникового щита (в МПа) (изолинии) в период ледникового максимума 90 тыс. лет назад

2009—2013 гг. (за пять лет до появления воронки в 2014 г.) и для оптимума голоцена. Зимняя температура в 2009—2013 гг. на $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ превышала соответствующую температуру в оптимуме голоцена. При современном потеплении климата повышение зимней температуры более значительно по сравнению с летней [8; 28], однако основное влияние на глубину протаивания и прочность ММП оказывает летний температурный режим. На рис. 2 представлены разности летней приповерхностной температуры в 2009—2013 гг. и в оптимуме голоцена с осреднением по ансамблю модельных расчетов.

Средняя для ансамбля модельных расчетов разность летней температуры у поверхности в 2009—2013 гг. и в оптимуме голоцена для Ямала получена равной $1,2 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Согласно полученным модельным результатам современное потепление на севере Западной Сибири уже превышает потепление в оптимуме голоцена. По данным климатических реконструкций на основе ширины годовых колец деревьев выявлено понижение летней температуры на Ямале от оптимума голоцена примерно до середины XIX в. [29; 35; 36]. По данным [22] в последние десятилетия отмечался быстрый рост летней температуры на Ямале. Согласно этим данным положительные температурные аномалии в начале XXI в. уже превышали температурные аномалии в оптимуме голоцена.

Таким образом, зафиксированные в 2014 г. воронки после газовых выбросов на Ямале могут быть следствием повышения приповерхностной температуры в последние годы с диссоциацией реликтовых гидратов, «переживших» потепление в оптимуме голоцена. Для определения современных термобарических условий метангидратов, сохранившихся

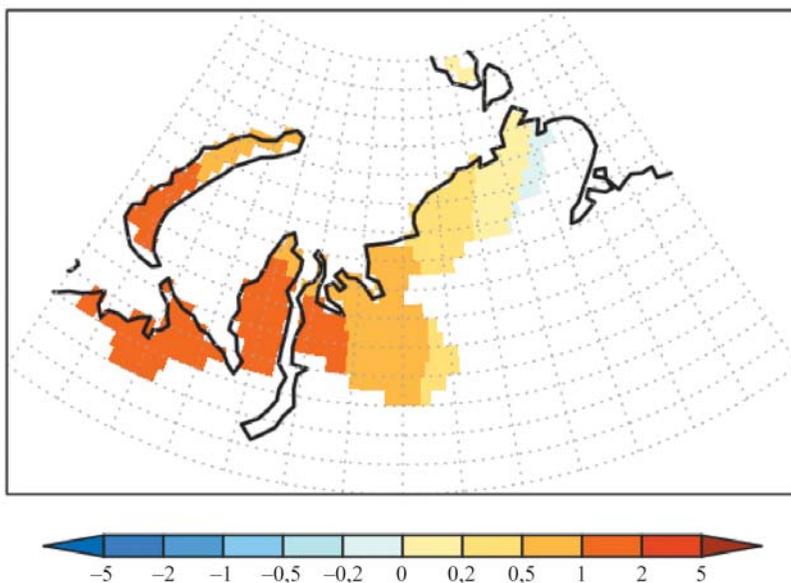


Рис. 2. Разность приповерхностной летней температуры (°C) в 2009–2013 гг. и в оптимуме голоцена по расчетам с ансамблем климатических моделей

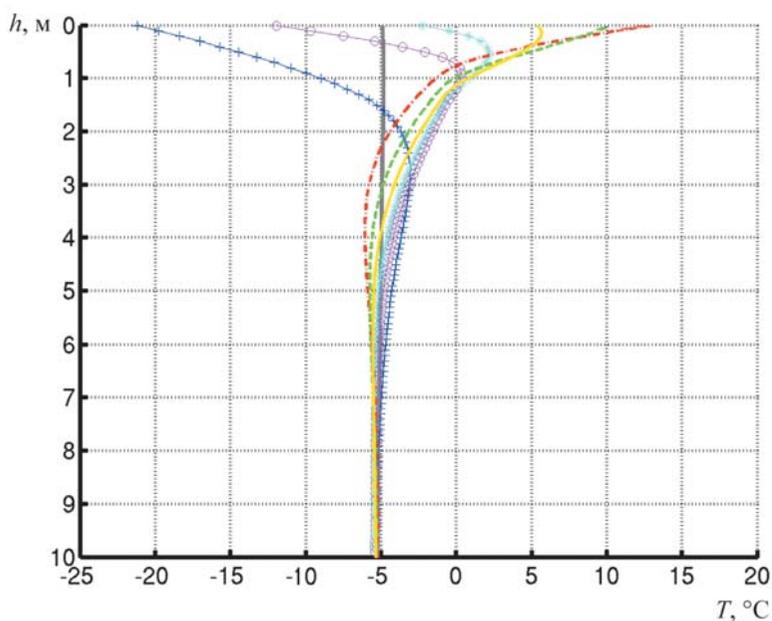


Рис. 3. Рассчитанные профили температуры ММП в январе (+), июле (-), августе (-), сентябре (-), октябре (-), ноябре (-) и в среднем за год (серый) за 2009–2013 гг. для района обнаруженной воронки (70,5° с. ш., 68° в. д.)

в многолетнемерзлых породах выше современной границы зоны стабильности, для региона Ямала были проведены расчеты с разработанной в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН моделью теплогазопереноса в грунте [1; 2] с заданием внешних атмосферных воздействий в соответствии с результатами расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей в рамках проектов CMIP5 и PMIP3. В расчетах до глубины 30 м теплофизические характеристики задавались в зависимости от типа пород согласно данным геологических

разрезов [25]. На нижней границе задавался геотермальный поток тепла с использованием данных [30].

На рис. 3 представлены рассчитанные профили температуры в верхних 10 м ММП для района обнаруженной воронки (70,5° с. ш., 68° в. д.) в июле-ноябре, а также в январе и в среднем за год для периода 2009–2013 гг. Среднегодовая температура грунта для этого периода на глубинах 5 и 10 м оценена равной $-5,0^{\circ}\text{C}$ и $-5,4^{\circ}\text{C}$ соответственно. Максимальная глубина протаивания в 2009–2013 гг. получена равной 1,2 м, что согласуется с данными измерений (около 1 м) [12]. Повышение температуры ММП приводит к увеличению давления в залежах МГ. Давление газа может превысить критический уровень, достаточный для разрушения кровли ММП [5; 6].

На основе расчетов термического состояния грунта для периода 2009–2013 гг. и экспедиционных данных о размерах воронки были сделаны оценки предельного давления, которое может выдержать мерзлая порода. Диаметр воронки составлял 15–16 м во время инструментальных измерений в июле 2014 г. [10]. В расчетах предельное давление определялось в зависимости от толщины и диаметра потенциальной воронки согласно [20]. Учитывалась зависимость предела прочности мерзлого грунта от температуры [23]. Расчеты проводились, в частности, для профиля температуры грунта в октябре.

Было определено давление диссоциации МГ в зависимости от температуры ММП [9; 13]. На рис. 4 представлены результаты расчета давления стабильного и метастабильного состояния МГ и оценки предельного давления, которое может выдержать массив ММП для трех радиусов цилиндрической воронки: 5, 7 и 9 м. Так, для радиуса воронки 7 м предельная толщина ММП, при которой давление МГ может превысить предел прочности грунта (1,5 МПа), оценена равной 6,9 м.

На основе проведенных с ансамблем климатических моделей расчетов термического состояния ММГ для каждой ячейки модельной сетки в пределах области, где граница зоны стабильности МГ может достигать поверхности (см. рис. 1), были рассчитаны ансамблевые средние и стандартные отклонения давления диссоциации МГ и предельного давления, которое может выдержать мерзлая порода. Риск газового выброса в атмосферу характеризовался вероятностью того, что предельное давление, которое может выдержать мерзлая порода, окажется меньше давления в залежах МГ. Вероятность определялась как функция Лапласа на основе средних и стандартных отклонений давления диссоциации МГ и предельного давления ММП. На рис. 5 представлены оценки вероятности газовых выбросов

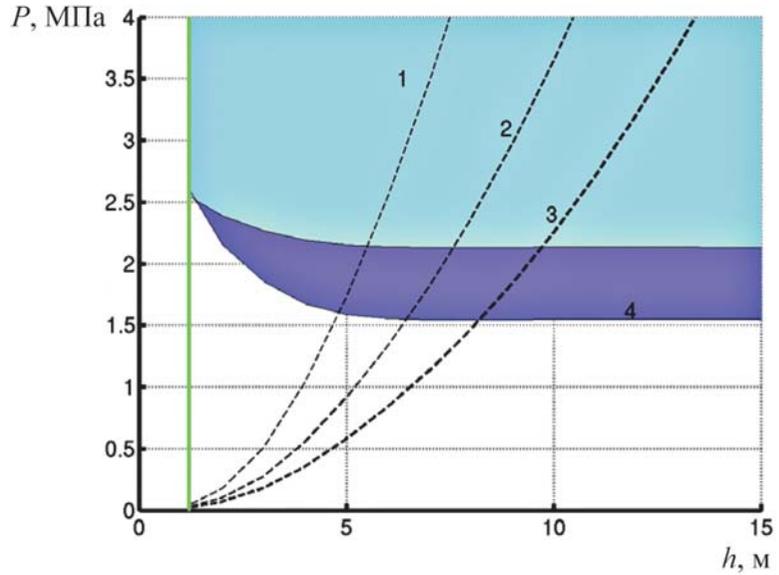


Рис. 4. Область стабильного (светло-голубой цвет) и метастабильного (фиолетовый цвет) состояния МГ и величина предельного давления для ММП с радиусами воронки 5 м (кривая 1), 7 м (кривая 2) и 9 м (кривая 3) в зависимости от толщины ММП. Предельная толщина, при которой давление МГ может превысить предел прочности ММП, определяется пересечением кривых 1, 2 и 3 с кривой метастабильного состояния 4. Вертикальной зеленой линией показана глубина слоя сезонного протаивания по результатам расчетов

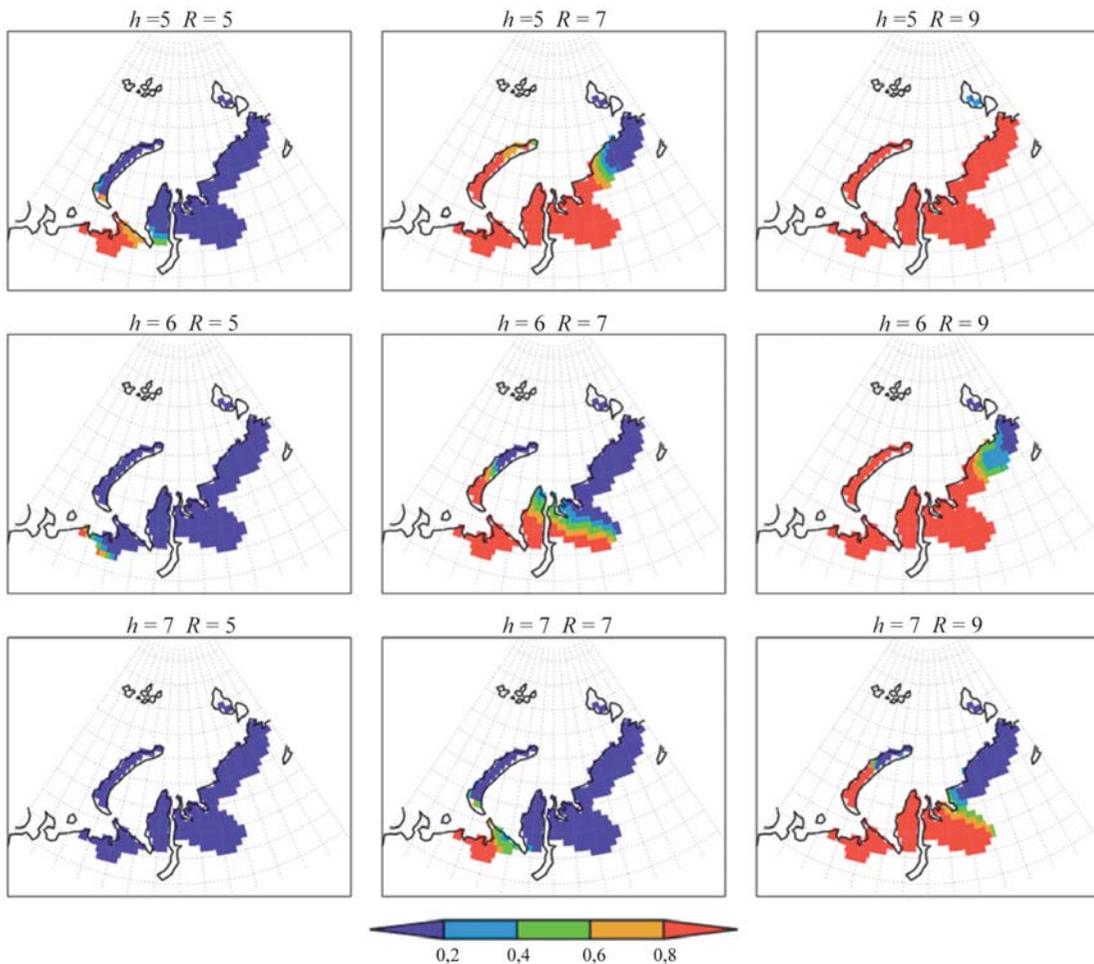


Рис. 5. Оценки вероятности выброса газа в атмосферу в результате дестабилизации метангидратов при современных изменениях климата при различных радиусах воронки (R , м) и толщинах ММП (h , м)

в атмосферу при дестабилизации газовых гидратов с учетом давления диссоциации и предельного давления, которое может выдержать массив ММП при различных радиусах воронки и толщинах ММП.

Предельное давление, которое может выдержать ММП, уменьшается с увеличением радиуса воронки. Это согласуется с результатами, полученными в [7]. Вероятность газового выброса в атмосферу увеличивается как с увеличением радиуса воронки, так и с уменьшением глубины залегания залежи МГ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что современные климатические изменения, в частности в регионе Ямала, приводят к существенному увеличению температуры ММП, наиболее значительному в осенний период. Это сказывается на устойчивости реликтовых гидратов газов континентальной криолитозоны, находящихся выше современной границы зоны стабильности. Приповерхностное потепление способствует также снижению прочности ММП. В результате это приводит к разрушению мерзлых пород и диссоциации газовых гидратов, которые «пережили», в частности, потепление в оптимуме голоцена. Особенности поверхности на Ямале, многочисленные небольшие озера круглой формы, составляющие около 97% общего количества озер в центральной части полуострова [19], свидетельствуют о достаточно высокой вероятности подобных событий в этом регионе. При этом часть озер, образовавшихся в оптимуме голоцена, которые ранее считались термокарстовыми, могли быть связаны с процессами газовых выбросов.

Работа выполнена в рамках программ РАН и проектов РФФИ (14-05-00639, 14-05-00193, 14-05-93089, 15-05-02157, 15-35-21061, 15-05-02457).

Литература

1. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. — 2007. — Т. 11, № 4. — С. 65—69.
2. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф. и др. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 86—93.
3. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Мохов И. И. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 7. — С. 31—42.
4. Аржанов М. М., Мохов И. И. Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: Сравнение модельных расчетов с данными наблюдений // Докл. АН. — 2013. — Т. 449, № 1. — С. 87—92.
5. Аржанов М. М., Мохов И. И., Денисов С. Н. Влияние региональных климатических изменений на устойчивость реликтовых газовых гидратов // Докл. АН. — 2016. — Т. 468, № 5. — С. 572—574.
6. Богдавленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
7. Богдавленский В. И., Гарагаш И. А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3. — С. 12—17.
8. Елисеев А. В., Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки на основе климатической модели ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 291—304.
9. Истомин В. А., Нестеров А. Н., Чувилин Е. М. и др. Разложение гидратов различных газов при температурах ниже 273 К // Газохимия. — 2008. — Т. 3, № 2. — С. 30—44.
10. Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Лейбман М. О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 2. — С. 15—25.
11. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. — 2016. — № 2. — С. 15—24.
12. Лейбман М. О., Плеханов А. В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холод. — 2014. — № 2. — С. 5—8.
13. Мельников В. П., Нестеров А. Н., Поденко Л. С. и др. Метастабильные состояния газовых гидратов при давлениях ниже равновесия лед-гидрат-газ // Криосфера Земли. — 2011. — Т. 15, № 4. — С. 80—83.
14. Мохов И. И. Современные изменения климата в Арктике // Вестн. РАН. — 2015. — Т. 85, № 5—6. — С. 478—484.
15. Мохов И. И., Безверхний В. А., Карпенко А. А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов и температурного режима атмосферы по палеореконструкциям для антарктической станции Восток // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 579—592.
16. Мохов И. И., Безверхний В. А., Карпенко А. А. Взаимные изменения температурного режима и содержания парниковых газов в атмосфере по палеореконструкциям для последних 800 тысяч лет // Экстремальные природные явления и катастрофы. — Т. 1: Оценка и пути снижения негативных по-

- следствий экстремальных природных явлений. — М.: ИФЗ РАН, 2010. — С. 312—319.
17. Мохов И. И., Елисеев А. В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX—XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Докл. АН. — 2012. — Т. 443, № 6. — С. 732—736.
18. Павлов А. В., Малкова Г. В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. — 2009. — Т. 13, № 4. — С. 32—39.
19. Слагода Е. А., Ермак А. А. Дешифрирование экзогенных процессов типичных тундр полуострова Ямал на примере территории района среднего течения реки Юрибей // Вестн. ТГУ. — 2014. — № 4. — С. 28—38.
20. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966. — 636 с.
21. Федосеев С. М. Газовые гидраты криолитозоны // Наука и образование. — 2006. — Т. 41, № 1. — С. 22—27.
22. Хантемиров Р. М., Сурнов А. Ю. Изменения температуры лета на Ямале по данным древесных колец // Динамика экосистем в голоцене: Материалы Второй российской научной конференции, Екатеринбург, 2010. — Екатеринбург, 2010. — С. 210—214.
23. Цытович Н. А., Сумгин М. И. Основания механики мерзлых грунтов. — М.: Изд-во АН СССР, 1937. — 432 с.
24. Чувилин Е. М., Буханов Б. А. Изменение теплопроводности газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании-оттаивании. — Ч. 1: Методика исследований // Криосфера Земли. — 2014. — Т. 18, № 1. — С. 70—76.
25. Чувилин Е. М., Якушев В. С., Перлова Е. В., Кондаков В. В. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (полуостров Ямал) // Докл. АН. — 1999. — Т. 369, № 4. — С. 522—524.
26. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
27. Якушев В. С., Перлова Е. В., Махонина Н. А. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Рос. хим. журн. — 2003. — Т. 47, № 3. — С. 80—90.
28. Arzhanov M. M., Eliseev A. V., Mokhov I. I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // Glob. Planet. Change. — 2012. — Vol. 86—87. — P. 57—65.
29. Briffa K. R., Shishov V. V., Melvin T. M. et al. Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia // Philosophical Transactions of the Royal Society. — 2008. — Vol. 363, № 1501. — P. 2271—2284.
30. Davies J. H. Global map of solid Earth surface heat flow // Geochem. Geophys. Geosyst. — 2013. — Vol. 14. — P. 1—15.
31. Glasser N. F., Siegert M. J. Calculating basal temperatures in ice sheets: an Excel spreadsheet method // Earth Surf. Process. Landforms. — 2002. — Vol. 27. — P. 673—680.
32. Ingolfsson O., Moller O., Lokrantz H. Late Quaternary marine-based Kara Sea ice sheets: a review of terrestrial stratigraphic data highlighting their formation // Polar Research. — 2008. — Vol. 27. — P. 152—161.
33. Kleman J., Fastook J., Ebert K. et al. Pre-LGM Northern Hemisphere ice sheet topography // Clim. Past. — 2013. — Vol. 9. — P. 2365—2378.
34. Lambeck K., Purcell A., Funde S. et al. Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modeling // Boreas. — 2006. — Vol. 35. — P. 539—575.
35. Solomina O. N., Bradley R. S., Hodgson D. A. et al. Holocene glacier fluctuations // Quaternary Science Rev. — 2015. — Vol. 111. — P. 9—34.
36. Wanner H., Beer J., Butikofer J. et al. Mid- to Late Holocene climate change: an overview // Quaternary Science Rev. — 2008. — Vol. 27. — P. 1791—1828.