

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ

под редакцией И. И. Мохова и В. А. Семенова



Москва
ФИЗМАТКНИГА
2022

ББК 20.18 + 26.237
К492
УДК 502.3:551.58(043.2)

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ. Под ред. И. И. Мохова и В. А. Семенова. — М.: Физматкнига, 2022. — 360 с. — ISBN 978-5-89155-286-9.

В книге представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН в сотрудничестве с другими научными институтами и организациями в течение последних лет при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00647) и Программ Российской академии наук. В первой части приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Во второй части рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. В третьей части приведены оценки возможных будущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

Для научных работников, специалистов в рассматриваемых областях, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Научное издание

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ

Под редакцией
Мохова Игоря Ивановича,
Семенова Владимира Анатольевича

Верстка выполнена в издательстве «Физматкнига»

Редактор издательства *А. К. Розанов*
Операторы верстки *И. А. Розанов, К. В. Чувилин*

Издательство «Физматкнига».
141701, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 3а.
Тел. (499) 390-51-38.

Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 29,2. Уч.-изд. л. 29,5. Тираж 120 экз.

Отпечатано с готовых pdf-файлов в ООО «Фотоэксперт».
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

ISBN 978-5-89155-286-9



9 785891 552869

© Коллектив авторов, 2022

© Физматкнига, 2022

7.3. Влияние климатических изменений на динамику многолетнемерзлых грунтов в XXI веке

М. М. Аржанов, А. В. Елисеев, И. И. Мохов

Согласно модельным оценкам продолжение общего роста глобальной приповерхностной температуры, отмеченного в последние десятилетия, возможно не только в XXI веке, но и в последующие несколько столетий [Мохов, Елисеев, 2012; Climate Change 2013]. При этом сильнее всего температурные изменения следует ожидать в арктических и субарктических широтах (арктическое усиление). Потепление на суше в высоких широтах и изменение количества осадков влияет на термический и гидрологический режимы криолитозоны. Данные наблюдений на геокриологических стационарах центральной и западной Сибири и Аляски демонстрируют систематическое увеличение глубины слоя сезонного протаивания [Гаврильев, Угаров, 2009; Melnikov et al., 2004], снижение кровли многолетнемерзлых пород и изменение рельефа мониторинговых площадок [Мажитова, Каверин, 2007]. Прогноз эволюции криолитозоны является важной задачей как для оценки рисков для существующей инфраструктуры полярных регионов, так и при проектировании новых объектов с учетом возможного изменения состояния многолетнемерзлых грунтов в XXI веке.

В [Аржанов и др., 2012; Аржанов и др., 2013] представлены оценки влияния климатических изменений на развитие фоновых геокриологических процессов с учетом особенностей деградации приповерхностной мерзлоты в переходных областях, где на протяжении XXI века режим сезонного протаивания многолетнемерзлых грунтов может смениться режимом сезонного промерзания. Расчеты проводились с глобальной климатической моделью, разработанной в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [Мохов и др., 2002; Мохов и др., 2005; Мохов и др., 2008], с учетом углеродного (включая метановый) цикла [Mokhov et al., 2008; Елисеев, 2011; Мохов и др., 2011; Eliseev, Mokhov, 2011; Мохов, Елисеев, 2012], а также блок для воспроизведения процессов тепло- и влагопереноса в грунте [Аржанов и др., 2007; Аржанов и др., 2008]. В численных экспериментах для XXI века использовались сценарии RCP (Representative Concentration Pathways) для антропогенных воздействий: RCP 2.6 (наименее агрессивных антропогенных воздействий), RCP 4.5, RCP 6.0 (умеренных воздействий) и RCP 8.5 (наиболее агрессивных воздействий).

Рост глобальной приповерхностной температуры в XXI веке по расчетам с КМ ИФА РАН составляет 0,8°C при сценарии RCP 2.6; 1,4°C при сценарии RCP 4.5; 1,8°C при сценарии RCP 6.0; 2,7°C при сценарии RCP 8.5 [Мохов, Елисеев, 2012]. Аналогичные оценки при сценариях семейства SRES составляют от 1,8°C при наиболее слабом антропогенном сценарии SRES B1 до 3,4°C при агрессивном сценарии SRES A2 (Climate Change 2007). Увеличение глобальной приповерхностной температуры в XXI веке при альтернативных российских сценариях [Аржанов и др., 2012] составляет 0,9–1,2°C. Общее потепление максимально над сушей внетропических широт Северного полушария и к последнему десятилетию XXI века относительно начала XXI века составляет от 1,2°C до 5,3°C в зависимости от сценария.

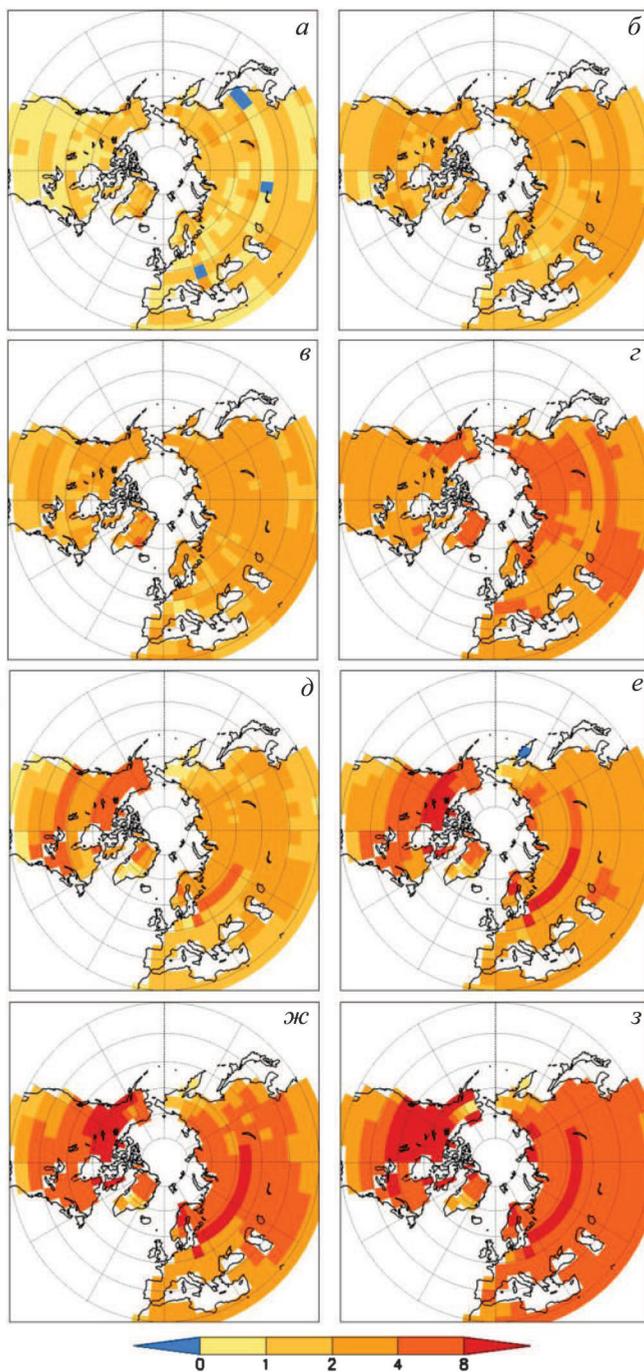


Рис. 7.3.1. Изменение летней (а–г) и зимней (д–з) приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$) к 2091–2100 гг. относительно 2001–2010 гг. по расчетам с климатической моделью ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а, д), 4.5 (б, е), 6.0 (в, ж) и 8.5 (г, з)

Изменения среднегодовой приповерхностной температуры над сушей высоких широт в 2091–2100 гг. относительно 2001–2010 гг. представлены на рис. 7.3.1а. К концу XXI века среднегодовое приповерхностное потепление максимально при наиболее агрессивном сценарии RCP 8.5 и составляет 4–7°C в Евразии и 4–9°C в Северной Америке. При умеренных сценариях антропогенного воздействия RCP 4.5 и 6.0 пространственная структура изменения

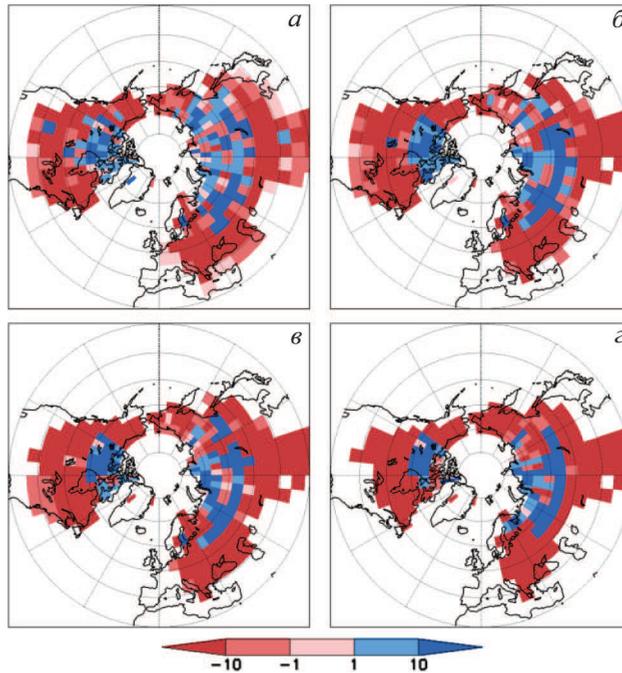


Рис. 7.3.2. Изменение водно-эквивалентной толщины снежного покрова (мм) в 2091–2100 гг. относительно 2001–2010 гг. по расчетам с климатической моделью ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в) и 8.5 (г)

приповерхностной температуры сохраняется, но абсолютные величины уменьшаются до 2–5°C в Евразии и 2–7°C в Северной Америке. При наименее агрессивном сценарии RCP 2.6 потепление в Евразии составляет 1–2°C, в Северной Америке 1–4°C.

При рассматриваемых сценариях RCP потепление зимой сильнее, чем летом над сушей Северного полушария, за исключением Чукотки, где при наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5, приповерхностная температура увеличивается в XXI веке на 1–2°C зимой и на 4–5°C летом. Изменение приповерхностной температуры в январе имеет выраженный максимум в высоких широтах Северной Америки (рис. 7.3.2а). Сходная пространственная структура изменения приповерхностной зимней температуры в XXI веке получена в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при альтернативных российских сценариях [Аржанов и др., 2012]. Приповерхностное потепление в июне максимально в Евразии при сценарии RCP 8.5 и составляет 3–5°C.

В проведенных численных экспериментах получено общее увеличение среднегодовых осадков над сушей внетропических широт в XXI веке (рис. 7.3.2a). Это согласуется с результатами расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы и океана [Мохов и др., 2003; Arzhanov et al., 2012]. В зависимости от сценария RCP в XXI веке среднегодовые осадки увеличиваются на 10–33% в Евразии и на 7–24% в Северной Америке. Наибольший рост среднегодовых осадков к концу XXI века получен в центральных и северных регионах Азии и в субарктических регионах Северной Америки. Наименьшее увеличение среднегодовых осадков получено для южных регионов Северной Америки и Средиземноморья. Аналогичный характер изменений выявлен при анализе долгопериодных трендов количества осадков в 1900–2005 гг. по данным наблюдений [Climate Change, 2007].

Пространственная структура изменения количества осадков в зимний и летний периоды сходна со структурой изменения среднегодовых осадков. К концу XXI века относительно его начала среднемесячные осадки в зимний период увеличиваются на 20–50% в Евразии и на 15–40% в Северной Америке. Результаты расчетов согласуются с оценками, полученными в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при альтернативных российских сценариях антропогенного воздействия (40–60% в центральной Сибири и 20–40% в субарктических широтах Северной Америки) [Аржанов и др., 2012].

Общая площадь снежного покрова в Северном полушарии в феврале в КМ ИФА РАН для 2001–2010 гг. составляет 45–47 млн км², что хорошо согласуется с эмпирическими оценками 43,2 млн км² [Мохов, 1993], 44–48 млн км² [Robinson and Frei, 2000], а также с результатами расчетов с КМ ИФА РАН для 1961–1990 гг. ($47,4 \pm 1,8$ млн км²) [Елисеев и др., 2009] и в ансамблевых численных экспериментах с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (49 ± 4 млн км²) [Павлова и др., 2007]. К последнему десятилетию XXI века в КМ ИФА РАН при сценариях RCP площадь снежного покрова в феврале сокращается на 4–13 млн км² в зависимости от сценария. Аналогичные оценки в расчетах с КМ ИФА РАН при сценариях SRES составляют 13–16 млн км² [Елисеев и др., 2009]. Меньшее значение (6 ± 2 млн км²) получено по результатам численных экспериментов с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Павлова и др., 2007].

Модельные оценки водно-эквивалентной толщины снежного покрова в феврале для 2001–2010 гг. в Евразии составляют 10–20 см. Значения до 30 см достигаются в Забайкалье и субарктических широтах Западной Сибири (см. рис. 7.3.2). Максимальные моделируемые значения водного эквивалента снега (порядка 50 см) получены в Тибете и на Чукотке. Подобное пространственное распределение толщины снежного покрова в феврале в Евразии получено в [Надежина и др., 2010] с учетом сезонных изменений плотности снега. По сравнению с данными реанализа ERA-40 [Uppala et al., 2005] значения водного эквивалента снега в КМ ИФА РАН выше в Тибете. Пространственное распределение водного эквивалента снега в Северной Америке с максимальными значениями 20–30 см на полуострове Лабрадор и в Скалистых горах хорошо согласуется с [Uppala et al., 2005].

К концу XXI века в КМ ИФА РАН происходит увеличение водно-эквивалентной толщины снежного покрова в высоких широтах центральных

регионов Евразии и Северной Америки (рис. 7.3.2). Уменьшение толщины снежного покрова отмечено в средних широтах Северного полушария, в Тибете, на Чукотке, Аляске, полуострове Лабрадор. Изменение толщины снежного покрова в XXI веке в КМ ИФА РАН определяется двумя факторами: уменьшением продолжительности холодного периода года и увеличением количества осадков. При этом в более высоких широтах преобладает эффект увеличения осадков при сохранении достаточного продолжительного холодного периода года, что приводит к росту снегозапаса. В средних широтах преобладает эффект уменьшения продолжительности холодного периода года.

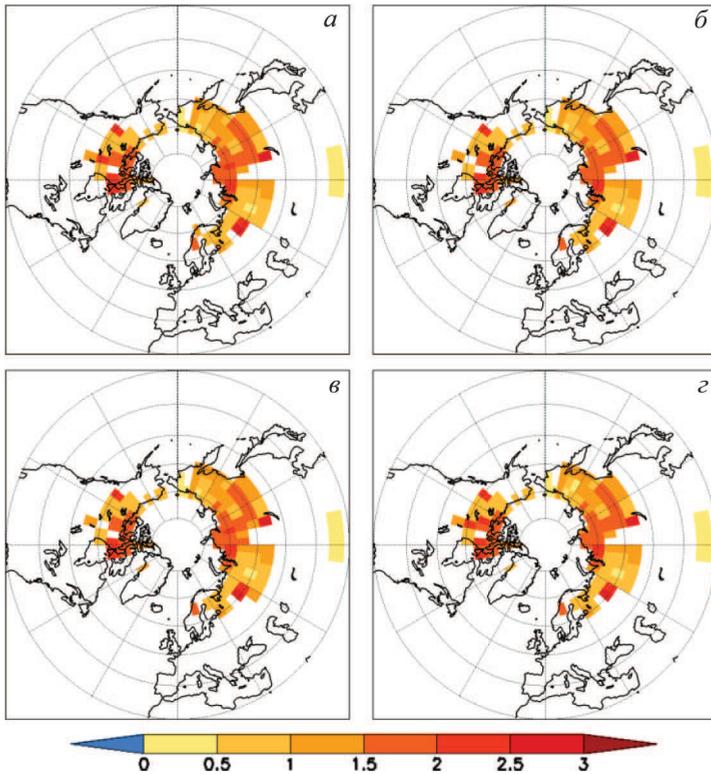


Рис. 7.3.3. Глубина сезонного протаивания (м) в 2001–2010 гг. по расчетам с климатической моделью ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в) и 8.5 (г)

Площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария в начале XXI века в КМ ИФА РАН (15,8 млн км²) находится в диапазоне эмпирических оценок (10,7–22,8 млн км²) [Zhang et al., 1999] площади сплошной и полной многолетней мерзлоты, а также согласуется со значениями, полученными на основе индексов относительной суровости (11–16 млн км²) [Демченко и др., 2002] и модельных расчетов (18–21 млн км²) [Павлова и др., 2007]. Значения площади распространения многолетнемерзлых грунтов в КМ ИФА РАН в начале XXI века составляют 11,4 млн км² в Евразии и 4,4 млн км² в Северной Америке. Следует отметить смещение южной

границы распространения приповерхностной мерзлоты к северу на Аляске, связанное с образованием таликов в этом регионе, в КМ ИФА РАН. Характерные значения глубин сезонного протаивания в начале XXI века составляют 0,5–1,0 м в Восточной Сибири, 1,0–2,0 м в центральной Сибири (см рис. 7.3.3). Наибольшие значения этой величины (порядка 2,5 м) достигаются на западе Западной Сибири и Прибайкалье. В Северной Америке модельные оценки глубин сезонного протаивания составляют 1,0–2,0 м. Наименьшие значения глубин сезонного протаивания (менее 0,5 м) получены в Тибете и на Чукотке, что связано с небольшой продолжительностью (менее 50 дней) бесснежного периода в этих областях в КМ ИФА РАН.

В XXI веке при антропогенном потеплении площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов в КМ ИФА РАН сокращается при всех рассматриваемых сценариях, составляя к концу XXI века 3 млн км² при наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 и 10,5 млн км² при наименее агрессивном сценарии RCP 2.6 (см рис. 7.3.4).

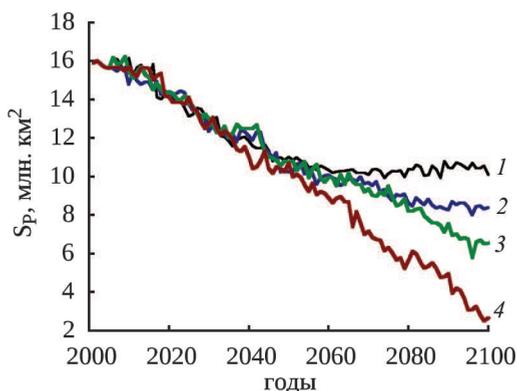


Рис. 7.3.4. Общая площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария по расчетам с климатической моделью ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (1), 4.5 (2), 6.0 (3) и 8.5 (4)

Аналогичные оценки, полученные по расчетам с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана, составляют 10 млн км² [Павлова и др., 2007].

Сокращение площади многолетнемерзлых грунтов в КМ ИФА РАН в XXI веке связано с деградацией приповерхностных мерзлых грунтов в Западной Сибири и Северной Америке. При наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 к концу XXI века деградация приповерхностных многолетнемерзлых грунтов происходит также в регионах восточной Сибири, что связано с увеличением продолжительности бесснежного периода в этом регионе (до 120 дней) и ростом летней температуры. В тех регионах, где к концу XXI века приповерхностные многолетнемерзлые грунты сохраняются, происходит увеличение глубин сезонного протаивания. Так, в центральной Сибири значения глубин сезонного протаивания возрастают до 1,5–2,0 м при умеренных сценариях антропогенного воздействия и до 2,0–2,5 м при агрессивном сценарии RCP 8.5. По результатам расчетов с КМ ИФА РАН к концу

XXI века в Тибете не происходит значительного увеличения глубин сезонного протаивания, что связано с небольшой продолжительностью бесснежного периода. Следует отметить более быструю деградацию приповерхностных многолетнемерзлых грунтов в Северной Америке по сравнению с Евразией. Аналогичная тенденция преобладающей деградации многолетнемерзлых грунтов в Северной Америке в XXI веке выявлена по расчетам с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Павлова и др., 2007].

В целом согласно полученным модельным оценкам можно ожидать рост среднегодовой приповерхностной температуры над сушей внетропических широт Северного полушария в течение XXI века в диапазоне 1,2–5,3 °C в зависимости от сценария. При этом годовые суммы осадков увеличиваются на 10–33% в центральных регионах Азии и на 7–24% в субарктических регионах Северной Америки, площадь снежного покрова в феврале сокращается от современного значения 45–47 млн км² до 32–41 млн км² в конце XXI века, а общая площадь приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария сокращается до 3,5–10,5 млн км² в зависимости от сценария. В соответствии с этими модельными оценками приповерхностные многолетнемерзлые грунты к концу XXI века могут сохраняться только в центральной и восточной Сибири и в Тибете (для относительно умеренных сценариев — также в субполярных регионах Северной Америки).

Список использованной литературы

1. Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Мохов И. И. Воспроизведение характеристик температурного и гидрологического режимов почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 591–610.
2. 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. XI. № 4. С. 65–69.
3. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Клименко В. В., Мохов И. И., Терешин А. Г. Оценки климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 6. С. 643–654.
4. 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 веке по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С. 31–42.
5. Гаврильев П. П., Угаров И. С. Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 1. С. 24–30.
6. Демченко П. Ф., Величко А. А., Елисеев А. В., Мохов И. И., Нечаев В. П. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконструкций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 165–174.
7. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // Метеорология и гидрология. № 11. С. 30–41.
8. Елисеев А. В. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.

9. *Елисеев А. В., Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Мохов И. И.* Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 291–304.

10. *Мажитова Г. Г., Каверин Д. А.* Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в Европейской части России // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 4. С. 20–30.

11. *Мохов И. И.* Диагностика структуры климатической системы. — Спб.: Гидрометеониздат, 1993. 271 с.

12. *Мохов И. И., Елисеев А. В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады АН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.

13. *Мохов И. И., Елисеев А. В., Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Денисов С. Н., Карпенко А. А.* Моделирование изменений климата в высоких широтах с использованием климатической модели ИФА РАН / В: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. III. Ч. II. Природные процессы в полярных областях Земли. — М.: ИГ РАН, 2008. С. 13–19.

14. *Мохов И. И., Семенов В. А., Елисеев А. В., Хон В. Ч., Аржанов М. М., Карпенко А. А., Денисов С. Н.* Изменения климата и их последствия в высоких широтах: диагностика и моделирование / В: Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. — М.: Paulsen, 2011. С. 96–130.

15. *Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч.* Оценка возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.

16. *Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М., Молькентин Е. К., Семиошина А. А.* Модельные оценки пространственных распределений характеристик снежного покрова и многолетнемерзлых грунтов на территории России // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 2. С. 87–97.

17. *Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Говоркова В. А.* Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 2. С. 3–13.

18. *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. V. 86–87. P. 57–65.

19. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* S. Solomon et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

20. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (Eds).* Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535 pp.

21. *Eliseev A. V., Mokhov I. I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // Adv. Atmos. Sci. 2011. V. 28. N 5. P. 1215–1232.

22. *Melnikov E. S., Leibman M. O., Moskalenko N. G., Vasiliev A. A.* Active-layer monitoring in the cryolithozone of West Siberia // Polar Geography. 2004. V. 5. N 4. P. 267–285.

23. *Mokhov I. I., Eliseev A. V., Karpenko A. A.* Decadal-to-centennial scale climate-carbon cycle interactions from global climate models simulations forced by anthropogenic emissions / In: Climate Change Research Trends (ed. Peretz L. N.). — Hauppauge, NY: Nova Sci. Publ., 2008. P. 217–241.

24. *Robinson D. A., Frei A.* Seasonal variability of northern hemisphere snow extent using visible satellite data // Prof. Geogr. 2000. V. 51. P. 307–314.

25. *Uppala S. M., Kallberg P. W., Simmons A. et al.* The ERA-40 reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005. V. 131. № 612. P. 2961–3012.

26. *Zhang T., Barry R. G., Knowles K. et al.* Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // Polar Geogr. 1999. V. 23. No. 2. P. 132–154.