

**ОЦЕНКА РОЛИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЕНИЯХ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

О.А. Анисимов*, А.Б. Шерстюков*****

* *Международный научно-образовательный центр «BEST» при институте естественных наук
Северо-Восточного федерального университета, 677000, г.Якутск, ул.Белинского, д.58*

** *Государственный гидрологический институт, 199053, С.Петербург, 2-ая Линия В.О., 23,
oleg@oa7661.spb.edu*

*** *Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации
- Мировой центр данных, 249035, Обнинск, ул. Королева, 6, Россия, artra@mail.ru*

Исследовано влияние природно-климатических факторов на современные изменения элементов криосферы. Выделены три главных фактора, - температура воздуха, сумма атмосферных осадков за холодный период и динамика растительности, которые оказывают влияние на состояние многолетнемерзлых грунтов в интервалах времени от нескольких лет до десятилетий. Получены оценки вклада температуры воздуха и осадков в изменчивость температуры грунтов. Построена эмпирико-статистическая модель, связывающая продуктивность и зональность растительности с климатическими индексами, и проведена ее валидация по спутниковым данным. Разработана и обоснована концепция моделирования современных и ожидаемых в будущем изменений многолетнемерзлых грунтов, учитывающая совместное влияние основных действующих факторов.

Природно-климатические факторы, многолетнемерзлые грунты, температура грунта, моделирование, сезонно-талый слой, изменчивость, вероятностно-статистический прогноз.

**EVALUATING THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON PERMAFROST.
PART 1. THE CURRENT STATE**

O.A. Anisimov*, A.B. Sherstiukov*****

* *International scientific and educational center "Best" of the environmental institute, North-East federal university, 677000, Yakutsk, Belinski str., 58*

** *State Hydrological Institute, 199053, 23, Second Line V.O., St.Petersburg, Russia,
oleg@oa7661.spb.edu*

*** *All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center, 249035,
Korolev str., 6, Obninsk, Russia, artra@mail.ru*

We studied the effect of the environmental drivers on the elements of the cryosphere and identified three main factors, air temperature, accumulated amounts of solid precipitation, and vegetation dynamics, which govern the state of permafrost at time scales from years to decades. We quantitatively evaluated the effects of the air temperature and precipitation on the soil temperature variations. We developed a statistical model linking bioproductivity and vegetation zones with climatic indexes and validated the model using satellite data. Ultimately, we constructed the conceptual model for predicting permafrost dynamics under the current and projected for the future climatic conditions, which accounts for the cumulative effect of major governing factors.

Environmental factors, permafrost, ground temperature, modeling, active layer, variability, stochastic prediction.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными наблюдениями выявлены изменения элементов природной среды, начавшиеся во второй половине 20 века, которые в совокупности подтверждают парадигму глобального изменения климата. Главными факторами, вызывающими эти изменения, являются температура воздуха, атмосферные осадки и растительность. Исчерпывающий анализ современных данных и обзор литературы даны в Пятом отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата [IPCC, 2013a, 2013b].

Данные об изменении климатических параметров на сети метеостанций России представлены на интер-

нет-портале ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД" www.meteo.ru. Результаты их анализа приведены в ежегодных докладах Росгидромета об особенностях климата [Доклад об особенностях..., 2015], а также во Втором оценочном докладе об изменении климата на территории России [Второй оценочный доклад..., 2014]. Анализ данных о современной динамике растительности бореальной и тундровой зоны проводится в [АСИА, 2005; IPCC, 2014]. Динамика растительности на территории России анализируется в публикациях [Анисимов и др., 2015; Чебакова, Парфенова, 2006]. Из указанных выше публикаций следует, что рост температуры отмечается во

все сезоны и на всех континентах, причем в криолитозоне России изменения почти вдвое превышают средние по планете, достигая $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [Доклад об особенностях..., 2015]. Атмосферные осадки демонстрируют изменения разной направленности в зависимости от региона и сезона с преобладанием на территории России тенденций к увеличению, в особенности весной и осенью [Доклад об особенностях..., 2015]. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения.

Изменения влияющих природно-климатических параметров по-разному влияют на элементы криосферы. Для снежного покрова закономерности хорошо изучены, благодаря спутниковым измерениям имеется большой объем данных за последние 35 лет. В первом приближении для целей прогностического моделирования площадь залегания и высота снежного покрова могут быть описаны однофакторными регрессионными зависимостями, соответственно, от температуры воздуха и от суммы осадков за холодный период. Также понятна, хорошо изучена и может быть относительно легко параметризована двухфакторная зависимость динамики ледников от соотношения изменений температуры и осадков. В динамике морских льдов помимо климатической (таяние в пределах Арктического бассейна), значительную роль играет и динамическая составляющая, сложность описания которой вносит наибольшую неопределенность в модельные расчеты. И, наконец, в случае многолетнемерзлых грунтов (ММГ) связь с климатическими факторами является наиболее сложной из-за влияния меняющихся напочвенных покровов, благодаря которым изменения температуры воздуха и грунтов могут существенно различаться и даже иметь противоположную направленность.

В следующем разделе анализируются данные наблюдений за элементами криосферы с целью выявления их климатообусловленной составляющей. Далее основное внимание уделяется анализу воздействия комплекса природно-климатических факторов на температуру ММГ и мощность сезонно-талого слоя (СТС). Результаты анализа используются для построения совмещенной динамической модели ММГ и растительности. В заключительной части предлагается концептуальная модель динамики криолитозоны, учитывающая основные влияющие на нее природно-климатические факторы.

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КРИОСФЕРЫ

Современные изменения криосферы наиболее проявились в площади распространения морских полярных льдов, минимальная величина которой в Северном полушарии по данным спутниковых наблюдений NOAA в период 1978-2014 гг. уменьшалась в среднем на $13.3\pm 2.8\%$ за каждые 10 лет (см. рис. 1).

Согласно современным представлениям, изменение площади морских льдов в Арктике обусловлено двумя главными факторами: таянием в пределах арктического бассейна, интенсивность которого непосредственно зависит от величины потепления, и выносом льда через пролив Фрама с последующим его таянием в Атлантике. По спутниковым данным за период 1979-2010 гг. ежегодно через пролив Фрама выносятся до 10% от общей площади арктического льда, в период

2003-2008 гг. в среднем за год вынос составлял $699 \pm 112 \times 10^3\text{ км}^2$ [Kwok, 2009]. Из-за недостаточной изученности и относительно небольшого объема наблюдений, с компонентой изменчивости площади морского льда за счет выноса за пределы арктического бассейна связана наибольшая неопределенность будущих прогнозов.

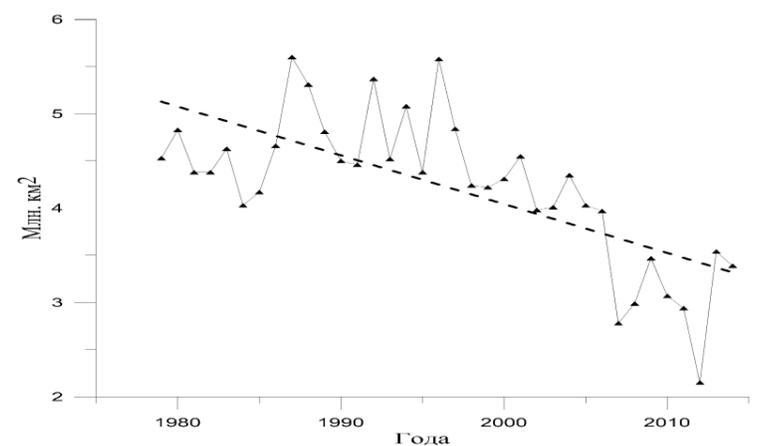


Рис. 1. Изменения минимальной площади распространения морских полярных льдов в Северном полушарии по данным спутниковых наблюдений NOAA за период 1978-2014 гг., млн. км². Рисунок построен по данным NOAA

<http://www.arctic.noaa.gov/detect/ice-seaice.shtml>.

За пределами морской Арктики индикатором современных изменений криосферы является снежный покров, максимальная площадь распространения которого в Северном полушарии в весенний период быстро сокращается. Наиболее сильно в период 1967-2012 гг. сократилась площадь залегания снега в Северном полушарии в июне (на 53%). Данные за более длительный период 1922-2012 гг. для марта и апреля указывают на сокращение площади снега на 7%, притом, что имеется высокая отрицательная корреляция с температурой воздуха этих месяцев, осредненной по широтной зоне 40° - 60° с.ш. [Vaughan et al., 2013]. Спутниковые измерения позволяют анализировать информацию о площади залегания снега в реальном времени, такие данные доступны на портале <http://climate.rutgers.edu/snowcover/>.

Чувствительным криосферным индикатором современных изменений являются ледники. Наблюдения за площадью и балансом массы [Bolch et al., 2012; Citterio et al., 2009; Gardner et al., 2013; Lopez et al., 2010; Masiokas et al., 2009], обобщение которых дано в [Dyurgerov, Meier, 2005; Vaughan et al., 2013], указывают на их климатообусловленное сокращение не только в Арктике, но и почти повсеместно на континентах обоих полушарий. В соответствии с наблюдаемым увеличением темпов потепления, глобальная скорость уменьшения массы всех ледников с 1970х годов также увеличивается. По имеющимся оценкам она составляла $226\pm 135\text{ Гт}$ в год в 1971-2009 гг., $275\pm 135\text{ Гт}$ в год в 1993-2009 гг. и $301\pm 135\text{ Гт}$ в год в 2005-2009 гг. [Vaughan et al., 2013]. Одним из немногих исключений в Северной Евразии является положительная динамика ледника Сторгласиарен на севере Швеции. Она обусловлена значительным увеличением приходной части баланса в виде зимних осадков, намного превосходящим также увеличивающуюся расходную часть, связанную с ростом температуры воздуха [Hock et al., 2007; Radic, Hock, 2006].

Самым большим по площади элементом криосферы в среднегодовом исчислении являются многолетне-

мерзлые грунты. По последним данным собственно ММГ занимают 9%-12% площади всех континентов (13.2-18.0 млн. км²), а вся криолитозона, в которую входят также области прерывистого и островного распространения, 234-25% суши [Gruber, 2012]. В России ММГ имеют сплошное распространение на площади в 7 млн км², на 1,8 млн км² – прерывистое и на 2,5 млн км² – островное и редкоостровное [Анисимов и др., 2012].

Для России изменения криолитозоны имеют первостепенное значение по трем причинам. Первая причина – экономическая. Значительная ее часть индустриально развита и имеет разветвленную транспортную, промышленную и городскую инфраструктуру. Устойчивость и надежность объектов инфраструктуры напрямую зависят от несущей способности ММГ, которая уменьшается с ростом температуры. Уже выявлены многочисленные проблемы и имеют место случаи частичного и полного разрушения объектов из-за деградации ММГ [Алексеева и др., 2007; Анисимов, Лавров, 2004; Гребенец, 2007; Гребенец, Ухова, 2008; Хрусталева и др., 2000; Хрусталева и др., 2011; Instanes et al., 2005; Nelson et al., 2001, 2002; Streletskiy, 2012; Streletskiy et al., 2014]. Вторая причина – экологическая. Многочисленные деструктивные геоморфологические процессы, развивающиеся при деградации ММГ, в том числе оползни, береговая эрозия, термокарстовые просадки, ведут к изменению гидрологического режима, заболачиванию, исчезновению и возникновению озер, гибели леса [Hinzman et al., 2005; Shiklomanov, Nelson, 2013; Shur et al., 2005; Woo, 2012]. Третья широко обсуждаемая причина – усиление эмиссии парниковых газов, в особенности метана, при таянии ММГ, что может повлиять на углеродный цикл и на глобальный климат [Streletskiy et al., 2014; Tarnocai et al., 2009; Wisser et al., 2011; Zimov et al., 2006].

При очевидной важности количественных оценок современного и прогнозируемого на будущее состояния криолитозоны, задача эта решена лишь частично. В отличие от остальных элементов криосферы, параметры состояния грунтов не подлежат непосредственному измерению со спутников, поэтому возможности мониторинга ограничены наземными наблюдениями и моделированием на основе зависимостей параметров ММГ от климата и ландшафтных характеристик, прежде всего от растительности. Исчерпывающий анализ наблюдательной сети криолитозоны дан в монографии [Анисимов и др., 2012].

Данные о состоянии криолитозоны России в различное время пополнялись из четырех источников. Самые продолжительные наблюдения дают измерения температуры почвы на метеостанциях Росгидромета до глубины 3,2 м [Шерстюков, Шерстюков, 2015; Frauenfeld et al., 2004]. Данные по многим станциям имеются на портале <http://www.meteo.ru>. В последние годы в рамках международного проекта GTN/P были предприняты усилия для систематизации геотермальных измерений в скважинах различной глубины, от первых десятков до сотни метров [Сергеев и др., 2007]. В России задействованы более 160 скважин, данные имеются на портале <http://gtnp.arcticportal.org/>. В 1990 г. была создана программа циркумполярного мониторинга деятельного слоя (Circumpolar Active-layer Monitoring, CALM), в рамках которой по стандартизированной методике [Brown et al., 2000] проводятся измерения мощности СТС, а на многих зарубежных площадках также и

температуры ММГ. Было создано около 170 пунктов наблюдений в 15 странах. В России в различное время были созданы 64 площадки CALM, однако сколько-нибудь продолжительные ряды (более 10 лет) имеются менее чем на 20 из них. Все полученные данные размещены на портале www.gwu.edu/~calm.

В 1960х годах были организованы комплексные круглогодичные теплобалансовые наблюдения на нескольких геофизиологических стационарах, результаты которых впервые были обобщены в монографии [Павлов, 1979] и представлены в серии статей [Павлов, 1997а; Павлов, 1997б, 2008а, 2008б]. В 1980-е годы число стационаров достигало 100, однако в 1990-х большая их часть была закрыта или законсервирована. В настоящее время действующих стационаров осталось около 30. Измерения на стационарах дали мощный импульс развитию математических моделей ММГ, однако в настоящее время требуется актуализация многих полученных параметризаций в связи с изменившимися климатическими условиями.

Наблюдения указывают на то, что ММГ испытывают на себе влияние глобальных изменений природной среды. В таблице 1 приведены данные мониторинга криолитозоны Северного полушария, полученные различными методами. Они выявили повсеместное увеличение температуры ММГ. С 1970-х годов на многих участках увеличение температура грунтов достигло 2 °С, при этом в «теплых» грунтах с температурой выше -2 °С отмечены в среднем вдвое меньшие изменения, что объясняется затратами тепла на фазовые переходы [Vaughan et al., 2013].

Таблица 1. Современная среднегодовая температура ММГ в различных регионах Северного полушария и ее изменения за период наблюдений [Vaughan et al., 2013].

Регион	Современная Т (°С)	ΔТ (°С)	Период
Северная Аляска	-5.0 ~ -10.0	0.6-3	1980е-2009
Дельта р. Макензи	-0.5 ~ -8.0	1.0-2.0	1960е-2009
Север Канады	-11.8 ~ -14.3	1.2-1.7	1978-2008
Центральная Аляска	0.0 ~ -5.0	0.0-0.8	1985-2009
Центр и Юг долины Макензи	>-2.2	0.0-0.5	1984-2008
Северный Квебек	>-5.6	0.0-1.8	1993-2008
Европейские Альпы	>-3	0.0-0.4	1990е-2010
Север ЕТР	-0.1 ~ -4.1	0.3-2.0	1971-2010
Скандинавия	-0.1 ~ -5.6	0.0-1.0	1999-2009
Северная Якутия	-4.3 ~ -10.8	0.5-1.5	1950е-2009
Транс-Байкальский регион	-4.7 ~ -5.1	0.5-0.8	1980е-2009
Тибетское плато	-0.2 ~ -3.4	0.2-0.7	1996-2010
Тянь-Шань	-0.4 ~ -1.1	0.3-0.9	1974-2009
Монголия	0.0 ~ -2.0	0.2-0.6	1970-2009

Длительные наблюдения на Европейской территории России (ЕТР) указывают на значительную дегра-

дацию этого участка криолитозоны. За последние 35 лет здесь произошло сокращение площади приповерхностной вечной мерзлоты, в наиболее южных районах островного распространения она полностью оттаяла [Оберман, Шеслер, 2009]. В Печорской низменности южная граница ММГ сместилась на 30-40 км, вдвое больше – до 80 км,- на равнинах Приуралья. Возникли многочисленные новые и углубились существовавшие талики, в том числе и в области сплошного распространения ММГ. В равнинной тундре границы сплошных и прерывистых ММГ сместились на 15-20 км, в Приуралье и в горах Пай-Хоя - на многие десятки километров. Почти повсеместно температура ММГ на глубинах 10-15 м увеличилась на 1-1.5 °С, активизировался термокарст. Эти наблюдения согласуются с произошедшим за последние 35 лет потеплением в регионе во все сезоны года. Региональные тренды температуры на севере ЕТР в период 1976-2013 составили в среднегодовом исчислении 0.4-0.6 °С/10лет, в том числе 0.2-0.6 °С/10лет зимой, 0.4-0.6 °С/10лет весной и осенью и 0.3-0.5 °С/10лет летом [Доклад об особенностях..., 2015]. Согласованность изменений указывает на возможность прогноза состояния ММГ, используя климатические данные и математические модели.

Еще в конце 19 века предпринимались попытки теоретически рассчитать распространение ММГ, используя их связь с климатическими параметрами [Вильд, 1882; Сумгин, 1927]. Уже в тот ранний период А.И. Воейков указывал на сложность этой задачи из-за теплового влияния напочвенных покровов [Воейков, 1884]. Изменения снежного покрова и растительности наиболее сложны для формализованного описания, поэтому проблема, обозначенная Воейковым, остается актуальной до настоящего времени. Вместе с тем, методы корреляционного анализа позволяют выделить и количественно оценить воздействие на ММГ отдельных природно-климатических факторов, используя ряды длительных наблюдений.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ММГ

Интегрирующим показателем состояния ММГ является среднегодовая температура на глубине ниже СТС. Нами был проведен анализ полного объема данных наблюдений на сети метеостанций России за период 1966-2012 и получены оценки вклада в ее вариацию температуры воздуха и снежного покрова. Вместо реальных величин высоты снега использовались измеряемые на метеостанциях суммы твердых осадков. Для оценки вклада каждого фактора использовались частные коэффициенты корреляции, определяемые следующими уравнениями:

$$D_{12} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2) \times (1 - r_{23}^2)}}, \quad (1)$$

$$D_{13} = \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{23}^2) \times (1 - r_{12}^2)}}$$

В уравнениях (1) D_{12} - частный коэффициент корреляции между температурой грунта и воздуха при ис-

ключении влияния суммы твердых осадков; D_{13} - частный коэффициент корреляции между температурой грунта и суммой твердых осадков при исключении влияния температуры воздуха. Парные коэффициенты корреляции r связывают следующие среднегодовые величины: r_{12} - температуру воздуха и грунта; r_{23} - температуру воздуха и и твердые осадки; r_{13} - твердые осадки и температуру грунта.

Вклады температуры воздуха и количества твердых осадков в общую дисперсию температуры грунтов на глубине 160 см показаны соответственно на рис. 2 и рис. 3. На картах помимо криолитозоны показана область сезонного промерзания грунтов, которая охватывает всю территорию России.

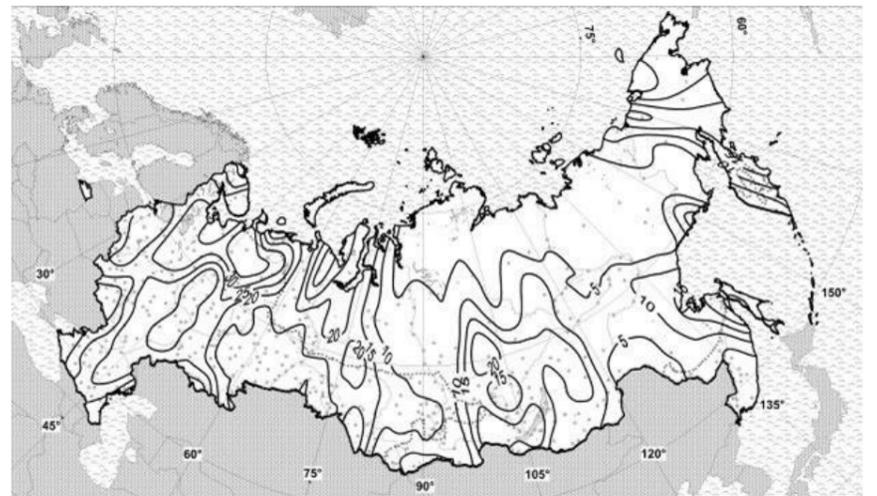


Рис. 2. Вклад температуры воздуха (в %) в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см. Пунктирной линией обозначена южная граница криолитозоны.

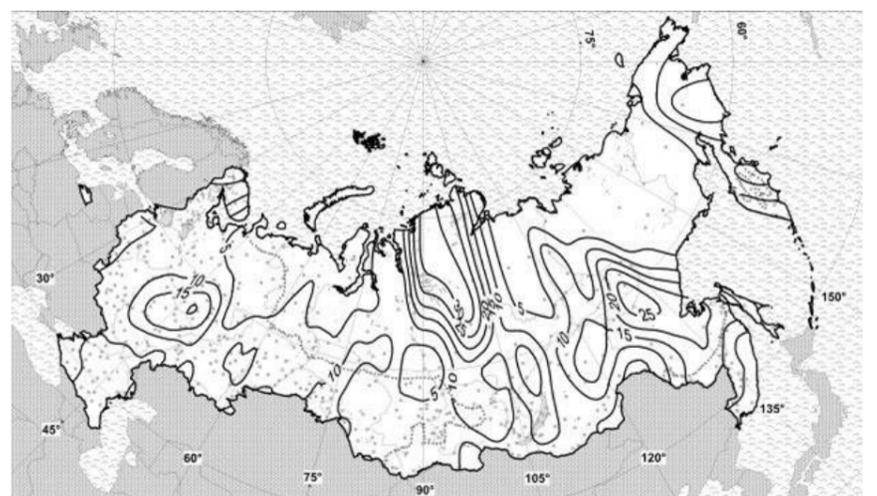


Рис. 3. Вклад суммы твердых осадков в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см. Пунктирной линией обозначена южная граница криолитозоны.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что почти повсеместно в наиболее уязвимой южной части криолитозоны (у южной границы), в области её островного и прерывистого распространения, вариации температуры воздуха вносят больший вклад в изменчивость температуры грунтов, чем снежный покров. Исключение составляют некоторые районы Центральной Сибири, где вклад этих двух факторов примерно одинаков.

С учетом этого, можно за главный фактор климатического воздействия на ММГ принять температуру воздуха и рассчитать безразмерный коэффициент уязвимости ММГ, $K_{\text{ММГ}}$, в основу которого положено соотношение между многолетними изменениями (трендом) среднегодовой температуры воздуха $\alpha_{\text{ТВ}}$ и соответствующими им изменениями температуры грунтов $\alpha_{\text{ТГ}}$:

$$K_{\text{ММГ}} = \alpha_{\text{ТП}} / \alpha_{\text{ТВ}} \quad (2)$$

Этот показатель отклика ММГ на изменения температуры воздуха использовался в ряде предшествующих работ [Анисимов и др., 2012; Израэль и др., 2006; Павлов, Малкова, 2009].

При вычислении $K_{\text{ММГ}}$ нами были отобраны метеостанции со статистически значимым (достоверность >95%) трендом температуры воздуха. Построенная по данным за период 1966-2012 карта уязвимости ММГ показана на рисунке 4.

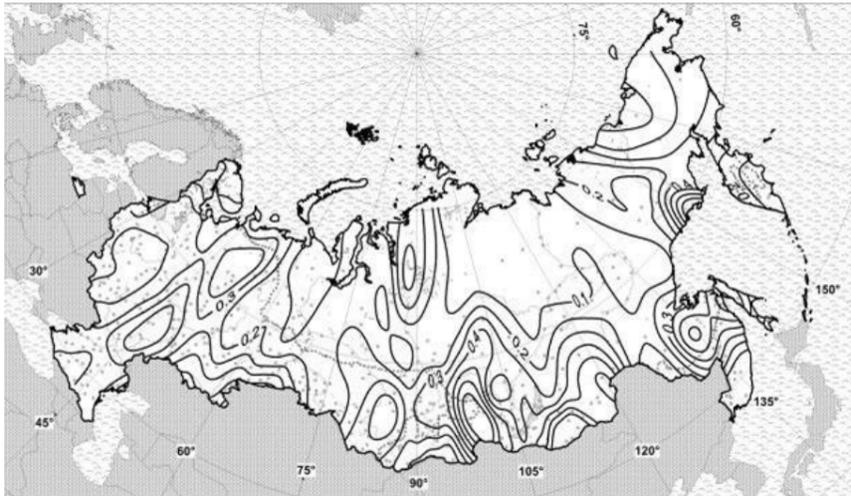


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициента уязвимости ММГ к современным изменениям климата на территории России. Пунктиром показана южная граница криолитозоны.

В силу того, что предшествующие работы [Анисимов и др., 2012; Израэль и др., 2006; Павлов, Малкова, 2009] были выполнены по ограниченному набору метеостанций с более короткими рядами наблюдений, региональные особенности полученных в них результатов отличаются от карты на рис. 4, которую можно разделить на четыре сектора: Европейская территория Российской Федерации (ЕТР , долгота $\lambda < 60^\circ \text{в.д.}$); Западная Сибирь ($60^\circ < \lambda < 90^\circ$); Восточная Сибирь ($90^\circ < \lambda < 120^\circ$); Дальний Восток ($\lambda > 120^\circ$). На большей части ЕТР коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится в пределах 0.2-0.3. В Ненецком автономном округе его значения минимальны, от 0.1 до 0.3, что свидетельствует об устойчивости температурного режима ММГ. При этом на обширной части территорий Архангельской области и республики Коми можно отметить более высокие значения, от 0.3 до 0.4.

В Западной Сибири преобладают значения $K_{\text{ММГ}}$ от 0.1 до 0.3. В Кемеровской области наблюдаются более высокие значения, от 0.3 до 0.4. Для территории распространения ММГ в пределах Западной Сибири наиболее характерны значения от 0.1 до 0.2, т.е. в целом здесь наблюдается низкая уязвимость ММГ.

В Восточной Сибири наиболее надежные выводы можно сделать по её Южной части, т.к. здесь сосредоточено наибольшее количество метеостанций.

В Иркутской области западнее о. Байкал коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится в пределах от 0.3 до 0.5. В Республике Бурятия и в Забайкальском крае коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится преимущественно в пределах от 0.4 до 0.5, местами до 0.7. Таким образом, ММГ на обширной территории вокруг о. Байкал обладают высокой уязвимостью к изменениям климата. На севере Восточной Сибири коэффициент уязвимости находится

в пределах от 0.1 до 0.3, однако для надежных выводов на данной территории недостаточно станций.

На Дальнем Востоке и в Якутии коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится в пределах от 0.1 до 0.3. Наиболее устойчивы ММГ к изменениям температуры воздуха ($K_{\text{ММГ}}$ от 0 до 0.2) на обширной территории в бассейне р. Лены – междуречье р.Вилуй, р.Лена и р.Алдан.

В Хабаровском крае вблизи границы ММГ, а также в примыкающей Сахалинской области коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится в пределах от 0.3 до 0.6, что свидетельствует о высокой уязвимости ММГ.

В Чукотском автономном округе коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ находится в пределах от 0.3 до 0.6, однако метеостанций здесь недостаточно для надежных выводов. В Камчатском крае значение $K_{\text{ММГ}}$ изменяется от 0.1 до 0.3.

Диапазон рассчитанных значений коэффициента уязвимости целесообразно разделить на три градации: $0 \div 0.3$ – низкая; $0.3 \div 0.4$ – средняя; >0.4 – высокая уязвимость, выделив соответствующие районы ММГ России.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Важен вопрос о физических механизмах, обуславливающих различия уязвимости ММГ в зависимости от физико-географических условий. Большую роль играет демпфирование вариаций атмосферных параметров напочвенными покровами, прежде всего, снегом и растительностью, которые сами подвержены изменениям в меняющихся климатических условиях. Роль снега хорошо изучена, имеющиеся данные наблюдений и модели позволяют оценивать ее количественно. Основной его эффект – обогревающий, поскольку снег является хорошим теплоизолятором.

Растительность, в особенности низший мохово-торфяной слой (его часто отождествляют с органическим слоем), является мощным регулятором взаимодействия изменяющегося климата и ММГ, представляя собой теплоизолятор, свойства которого меняются с течением времени. Эти изменения могут иметь две формы. В одном случае меняются лишь продуктивность и биомасса растений при неизменном составе и ареалах биомов. Так, в наиболее холодных участках криолитозоны увеличение температуры воздуха ведет к увеличению сомкнутости мохово-лишайникового покрова и суммарной биомассы. При этом возрастает теплоизолированность ММГ, и в ряде случаев может иметь место уменьшение их температуры и мощности СТС. Подобная зависимость биомассы от теплообеспеченности характерно и для других северных биомов, однако изменение продуктивности и биомассы высшей сосудистой растительности оказывает иное влияние, главным фактором является увеличение проективного покрытия листвы и обусловленное этим усиление затененности грунта, что понижает его температуру в летний период. Таким образом, этот тип изменений всегда приводит к демпфированию вариаций атмосферных параметров.

Иная форма воздействия растительности на ММГ связана с изменением видового состава биомов и смещением их ареалов. В наиболее холодной части криолитозоны изменение климата приводит к замещению мхов и лишайников сосудистыми растениями, в первую очередь граминоидами (травы и злаковыми). В типичной и южной тундре индикаторами изменения биомов является экспансия кустарников и смещение границы леса.

Изменения состава биомов могут оказывать как тепляющее, так и охлаждающее воздействие. Так, кустарники хорошо удерживают снег и способствуют большому снегонакоплению, в результате температура ММГ в зимний период увеличивается. В то же время интродукция высших растений приводит к большому затенению грунтов, и в летний период их температура понижается. Результирующий эффект зависит от соотношения этих противоположных воздействий.

Данные полевых измерений показывают увеличение биомассы растений за последние 30 лет во многих районах Арктики [Elmendorf et al., 2012; Urban et al., 2014]. Согласно спутниковым данным, на 37% территории Арктики произошло значительное увеличение индекса NDVI, т.е. Арктика стала более «зеленой», что свидетельствует об увеличении фитомассы [Xu et al., 2013]. Ранее была показана репрезентативность NDVI для оценки продуктивности многих экосистем, в том числе арктических и субарктических [Raynolds et al., 2012], а также обоснована возможность эффективного использования этого показателя для мониторинга динамики растительного покрова [Beck, Goetz, 2011; Walker et al., 2012]. За период 1982-2008 гг. в целом по всей Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21%, а индекс NDVI вырос на 7% [Bhatt et al., 2010]. В ряде публикаций отмечается смещение границ растительных зон под воздействием изменения климата [Gonzalez et al., 2010; Hickling et al., 2006], и в частности сокращение площади арктической тундры [Forbes et al., 2010]. На Кольском полуострове спутниковые данные указывают на смещение к северу границы тундры и лесотундры, продвижение лесотундровой растительности вверх по склонам, замещение лишайниковой тундры кустарничковой, зарастание болот древесно-кустарниковой растительностью [Кравцова, Лошкарева, 2010]. Прогностические расчеты по динамическим моделям указывают на то, что эти процессы будут усиливаться, и в 21 веке северная и типичная тундра могут быть полностью вытеснены кустарничковой и кустарниковой тундрой, а также лесотундрой [Pearson et al., 2013].

Климатообусловленные изменения растительности приводят к нелинейности в соотношениях между трендами температур воздуха и грунта и сложному пространственному распределению коэффициента уязвимости $K_{\text{ММГ}}$. В результате он частично утрачивает свою предсказательную силу в меняющихся условиях, поскольку в построенных на его основе простых регрессионных моделях термического режима ММГ остается неучтенным влияние растительности. Это в полной мере относится ко всему классу регрессионных моделей, связывающих температуру ММГ и мощность СТС с атмосферными параметрами, в числе которых широко употребляемые воздушно- и почвенно-мерзлотные индексы, N-факторная модель, T-Top и подобные им. Обзор таких моделей дан в [Riseborough et al., 2008]. Для устранения этой проблемы моделирование ММГ необходимо проводить с учетом изменений растительности. Поскольку изменения видового состава и ареала биомов происходят на порядки медленнее, чем изменения температуры ММГ и мощности СТС, необязательно применять динамически связанные модели этих процессов.

Для изучения климатообусловленных изменений растительности нами была построена эмпирико-статистическая модель, связывающая границы распространения биомов с климатическими индексами тепло-

обеспеченности и увлажнения. Исчерпывающее описание модели дано в публикациях [Анисимов и др., 2011; Жильцова, Анисимов, 2013]. Модель была дополнена модулем расчета межгодовой климатообусловленной изменчивости биомассы, для калибровки которого использовались спутниковые измерения индекса фотосинтетической активности NDVI [Анисимов и др., 2015]. Не повторяя этих публикаций, приведем лишь краткое описание модели, расчеты по которой позволяют количественно оценить роль растительности как фактора воздействия на ММГ.

В модели постулируется, что распределение биомов на поверхности суши определяется тремя основными климатическими факторами:

1. сумма температур выше 5°C ($\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$) – характеризует температурный режим вегетационного периода, а также неявно учитывает изменение мощности СТС в области криолитозоны, поскольку она, в первом приближении, связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур;
2. сумма температур ниже 0°C ($\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$) – характеризует суровость зим;
3. индекс увлажнения (D), равный отношению суммы температур выше 5°C к годовому количеству осадков.

Для калибровки модели была построена карта растительности оптимальной детализации, включающая 15 биомов, из которых первые 9 распространены в криолитозоне, см. рис. 5.

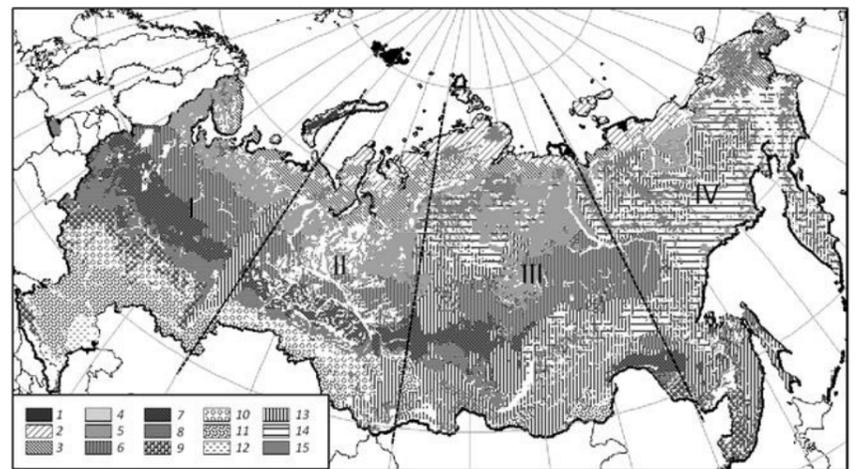


Рис. 5. Карта растительных зон России. 1 – полярная пустыня; 2 – северная тундра; 3 – южная тундра; 4 – лесотундра; 5 – северная тайга; 6 – средняя тайга; 7 – южная тайга; 8 – подтайга (смешанный лес); 9 – широколиственный лес; 10 – лесостепь; 11 – степь; 12 – полупустыня; 13 – горная тайга; 14 – субальпийские редколесья; 15 – альпийская тундра. Римскими цифрами обозначены сектора: I - европейская часть России (до 60° в.д.), II – Западная Сибирь (до 90° в.д.), III – Восточная Сибирь (до 130° в.д.), IV – Дальний Восток.

Были рассчитаны значения трех климатических индексов-предикторов, осредненные за период 1901-1980 гг., в течение которого сформировалась современная растительная зональность. Далее была проведена ординация биомов в пространстве индексов-предикторов и определены интервалы значений индексов для каждого биома. В силу физико-географических различий ординация проводилась отдельно для четырех секторов на Европейской территории России (ЕТР, до 60° в.д.), Западной Сибири (до 90° в.д.), Восточной Сибири (до 130° в.д.) и Дальнего Востока. Модель была

использована совместно с ансамблевой климатической проекцией на основе гидродинамических моделей последнего поколения CMIP5 для того, чтобы рассчитать смещение границ биомов в первой четверти и в середине 21 века. Полученные прогностические карты растительности приведены в работах [Анисимов и др., 2011; Жильцова, Анисимов, 2013] и здесь не воспроизводятся. Они показывают, что на значительной части криолитозоны в каждом из рассматриваемых четырех секторов будут усиливаться наблюдаемые уже сейчас изменения растительной зональности. С позиций воздействия на ММГ важной метрикой является отношение суммарной площади участков, на которых произойдет изменение типа биомов, к общей площади криолитозоны в каждом из секторов. Эти данные, полученные в модельных расчетах, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Доли территории (%), на которых прогнозируется изменение типа биомов к первой четверти (среднее за 2016-2045 гг.) и к середине (2031-2060 гг.) 21 века.

Период	ЕТР	Западная Сибирь	Восточная Сибирь	Дальний Восток	Россия в целом
2016-2045 гг.	58	64	55	48	56
2031-2060 гг.	71	74	70	57	67

Изменения растительной зональности происходят медленно и никак не влияют на межгодовую изменчивость температуры ММГ и мощности СТС. Поэтому их следует отнести к факторам, влияющим на длительные изменения ММГ во временном масштабе не менее нескольких десятилетий. Межгодовые вариации биопродуктивности и фитомассы, напротив, оказывают немедленное воздействие на ММГ. Для его изучения нами были использованы данные измерений NDVI со спутников NOAA за период 1982-2012 гг., размещенные на портале <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vhftp.php>.

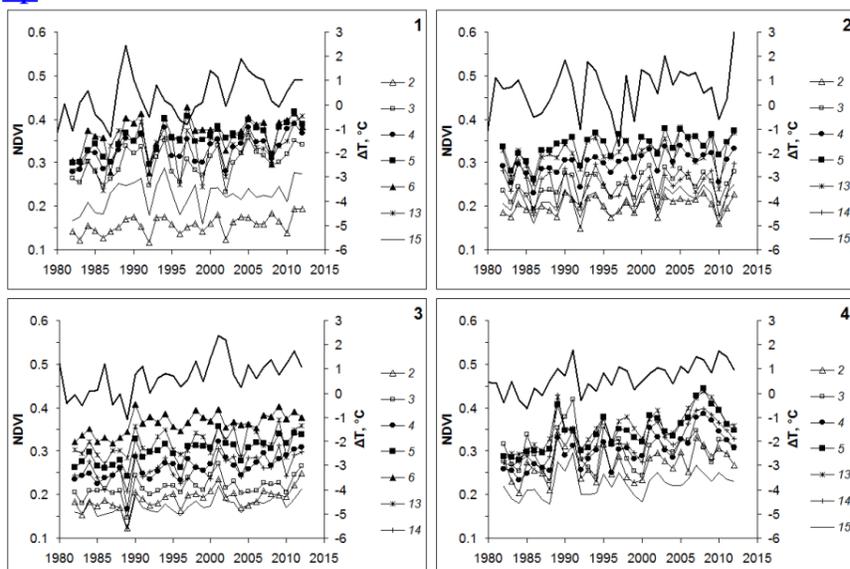


Рис. 6. Изменения NDVI по растительным зонам в четырех секторах Российской Арктики: 1 – Европейская часть, 2 – Западная Сибирь, 3 – Восточная Сибирь, 4 – Дальний Восток. Обозначения растительных зон те же, что и на рис. 5. Верхняя кривая показывает аномалии летней температуры воздуха по отношению к норме 1961-1990 гг., осредненной по соответствующим регионам, значения которой указаны на вертикальной оси справа.

На рисунке 6 показаны изменения NDVI, осредненные по каждой из рассматриваемых растительных зон в четырех секторах Северной Евразии. На графиках видна сильная межгодовая изменчивость NDVI, а следовательно, и зеленой фитомассы. Анализ выявляет наличие положительных корреляций этих изменений с температурой воздуха, осредненной за летний период, со значениями коэффициента корреляции до 0.70 [Анисимов и др., 2015]. Аномалии температуры показаны в верхней части рисунков. Как было показано ранее, увеличение фитомассы в полярной пустыне и в северной тундре демпфирует положительную аномалию температуры воздуха, а в остальных зонах эффект может быть как усиливающим, так и ослабляющим. Во всех случаях межгодовая климатообусловленная изменчивость фитомассы является важным фактором, оказывающим безинерционное воздействие на ММГ. В значительной степени его действием объясняется то, что показанный на рисунке 4 коэффициент уязвимости ММГ имеет столь сложное пространственное распределение, а связь изменений температуры воздуха и ММГ является нелинейной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа, приведенные в статье, указывают на то, что все элементы криосферы испытывают на себе значительное влияние меняющихся климатических факторов, и в наибольшей степени чувствительны к температуре воздуха. Отличительной чертой ММГ является модуляция колебаний температуры воздуха напочвенными покровами, и прежде всего, растительностью. Климатообусловленные изменения растительности укладываются в следующую концептуальную модель. Прямым и безинерционным откликом растительности на климатическое воздействие является изменение фотосинтетической активности и фитомассы при сохранении целостности растительной зоны. Оценить его можно при помощи регрессионных зависимостей NDVI от летней температуры воздуха. Однако границы растительных зон остаются неизменными лишь до тех пор, пока климатическое воздействие не превысит некоторый критический уровень, который является специфичным для каждой зоны. При дальнейшем воздействии начнется конкурентное подавление и вытеснение одних видов и инвазия новых функциональных типов растений. Продуктивность образуемых новых растительных сообществ более не может быть описана регрессионными уравнениями, полученными по данным для изначальной растительной зональности. На сегодняшний день это является главным препятствием уменьшения неопределенности модельных прогнозов состояния ММГ.

Анализ неопределенности, вносимой климатическими данными, и сравнению результатов, полученных с использованием различных климатических проекций посвящена следующая работа, которая находится в стадии завершения.

Данная работа поддерживается грантом Российского Научного Фонда (проект 14-17-00037).

Литература

- Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н. и др.** О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) // Криосфера Земли, 2007, т. VI, №2, с.76-83.
- Анисимов О.А.** Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования // Москва, Гринпис, 2010, 44 с.
- Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А. и др.** Континентальная многолетняя мерзлота // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем. С.М. Семенов. Москва, 2012, 268-328 с.
- Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю.** Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исследования Земли из Космоса, 2015, №3, с.
- Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А.** Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология, 2011, №11, с.31-42.
- Анисимов О.А., Лавров С.А.** Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК // Технологии ТЭК, 2004, №3, с.78-83.
- Вильд Г.И.** О температуре воздуха в Российской империи. Вып. 2, ч. IV // Санкт-Петербург, 1882, 359 с.
- Войков А.И.** Климаты земного шара, в особенности России // Санкт-Петербург, Издание картографического заведения А.Ильина, 1884, 640 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.** // Москва, ФГБУ "НИЦ "Планета", 2014, 58 с.
- Гребенец В.И.** Деформации объектов в криолитозоне при непрогнозируемых изменениях сложных инженерно-геокриологических условий оснований // Инженерная геология, 2007, №3, с.17-20.
- Гребенец В.И., Ухова Ю.А.** Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2008, №5, с.24-28.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год** // Москва, Росгидромет, 2015, 107 с.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.** Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Ю.А. Израэль. М.: "Планета", 2013, 360-374 с.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. и др.** Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на Территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология, 2006, №5, с.27-38.
- Кравцова В.И., Лошкарева А.Р.** Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения // Вестник МГУ, сер. Геогр., 2010, №6, с.49-57.
- Оберман Н.Г., Шеслер И.Г.** Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны). // Разведка и охрана недр, 2009, №7, с.20-30.
- Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов // Новосибирск, Наука, 1979, 282 с.
- Павлов А.В.** Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1997а, т.4, 61-75.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997б, т. I, №1, с.47-58.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны // Новосибирск, Академическое издательство "ГЕО", 2008а, 229 с.
- Павлов А.В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008б, т. VII, №3, с.22-27.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. VIII, №4, с.32-39.
- Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Романовский В.Е.** Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли, 2007, т. XI, №2, с.19-26.
- Сумгин М.И.** Вечная мерзлота почвы в пределах СССР // Москва, Владивосток, 1927, с.
- Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П.** Многолетние изменения температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли, 2000, т. IV, №3, с.35-41.
- Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В.** Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата: монография // Москва, Университетская книга, 2011, 260 с.
- Чебакова Н.М., Парфенова Е.И.** Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу XX века в Средней Сибири // Вычислительные технологии, 2006, т.7, №3, с.77-86.
- Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г.** Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // Метеорология и гидрология, 2015, №2, с.5-12.
- ACIA Arctic Climate Impact Assessment,** Cambridge University Press, 2005, 1042 p.
- Beck P.S.A., Goetz S.J.** Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences // Environmental Research Letters, 2011, v.6, №045501, p.10.
- Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K. et al.** Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea-ice decline // Earth Interactions, 2010, №14, doi: 10.1175/2010EI1315.1171.
- Bolch T., Kulkarni A., Kaab A. et al.** The State and Fate of Himalayan Glaciers // Science, 2012, v.336, №6079, p.310-314.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geography, 2000, v.24, №3, p.165-258.
- Citterio M., Paul F., Ahlstrom A.P. et al.** Remote sensing of glacier change in West Greenland: accounting for the occurrence of surge-type glaciers // Annals of Glaciology, 2009, v.50, №53, p.70-80.
- Dyurgerov M.B., Meier M.F.** Glaciers and the changing earth system: a 2004 snapshot // Occasional Paper 58. University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research, 2005, 117p.
- Elmendorf S.C., Henry G.H.R., Hollister R.D. et al.** Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming // Nature Climate Change, 2012, v.2, p.453-457.
- Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P.** Russian Arctic warming and "greening" are closely tracked by tundra shrub willows // Global Change Biology, 2010, №16, p.1542-1554.
- Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D.** Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia // Journal of Geophysical Research, 2004, v.109, №D05101, doi:1029/2003JD004245
- Gardner A.S., Moholdt G., Cogley J.G. et al.** A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009 // Science, 2013, v.340, p.852-857.
- Gonsalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J.** Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // Global Ecology and Biogeography, 2010, №19, p.755-768.
- Gruber S.** Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere, 2012, v.6, p.221-233.
- Hickling R., Roy D.B., Hill J.K. et al.** The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards // Global Change Biology, 2006, №12, p.450-455.
- Hinzman L.D., Bettes N.D., Bolton W.R. et al.** Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions // Climatic Change, 2005, v.72, №3, p.251-298.
- Hock R., Radic V., de Woul M.** Climate sensitivity of Storglaciaren – An intercomparison of mass balance models using ERA-40 reanalysis and regional climate model data // Annals of Glaciology, 2007, v.46, p.342-348.
- Instanes A., Anisimov O., Brigham L. et al.** Infrastructure: Buildings, Support Systems, and Industrial Facilities // Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, Cambridge University Press, 2005, p.907-944.
- IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis.**

- Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013a, 1535 p.
- IPCC Summary for Policymakers** // 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. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013b, 1–30 p.
- IPCC Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects.** Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2014, 688 p.
- Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H. J., and Yi D.** Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008 // *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2009, v.114, №C7.
- Lopez P., Chevallier P., Favier V. et al.** A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America // *Global and Planetary Change*, 2010, v.71, №1-2, p.85-108.
- Masiokas M.H., Rivera A., Espizua L.E. et al.** Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years // *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009, v.281, №3-4, p.242-268.
- Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I.** Subsidence risk from thawing permafrost. // *Nature*, 2001, №410, p.889-890.
- Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I.** Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions // *Natural Hazards*, 2002, v.26, №3, p.203-225.
- Pearson R.G., Phillips S.J., Loranty M.M. et al.** Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change // *Nature Climate Change*, 2013, v.3, p.673-677.
- Radic V., Hock R.** Modelling future glacier mass balance and volume changes using ERA-40 reanalysis and climate models – A sensitivity study at Storglaciaren, Sweden // *Journal of Geophysical Research*, 2006, v.111, №F03003.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Epstein H.E. et al.** A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHR-NDVI // *Remote Sensing Letters*, 2012, v.3, №5, p.403-411.
- Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmuller B. et al.** Recent advances in permafrost modelling // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, v.19, №2, p.137-156.
- Shiklomanov N., Nelson, F.** Thermokarst and civil infrastructure // *Treatise on Geomorphology*. J.F. Shroder. San Diego, Academic Press, 2013, p.354-373.
- Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E.** The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, №16, p.5-17.
- Streletskiy D.A., Anisimov O.A., Vasiliev A.A.** Permafrost Degradation // *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. W. Haeberli, C. Whiteman, Elsevier, 2014, p.303-344.
- Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E.** Permafrost, infrastructure and climate change: A GIS-based landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2012, v.44, №3, p.368-380.
- Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al.** Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, №23, GB2023.
- Urban M., Forkel M., Eberle J. et al.** Pan-Arctic Climate and Land Cover Trends Derived from Multi-Variate and Multi-Scale Analyses (1981-2012) // *Remote Sensing*, 2014, v.6, p.2296-2316.
- Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I. et al.** Observations: Cryosphere // *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. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, p.317-382.
- Walker D.A., Epstein H.E., Raynolds M.K. et al.** Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // *Environmental Research Letters*, 2012, v.7, №015504, p.1-17.
- Wisser D., Marchenko S., Talbot J. et al.** Soil temperature response to 21st century global warming: the role of and some implications for peat carbon in thawing permafrost soils in North America // *Earth System Dynamics*, 2011, v.2, p.1-18.
- Woo M.-K.** Permafrost Hydrology // Berlin, Springer-Verlag, 2012, 563 p.
- Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S. et al.** Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nature Climate Change*, 2013, v.3, p.581-586.
- Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S.** Permafrost and the global carbon budget // *Science*, 2006, v.312, №5780, p.1612-1613.