

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 551.581

ОЦЕНКА РОЛИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
В ИЗМЕНЕНИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

О.А. Анисимов\*, А.Б. Шерстюков\*\*

\* Государственный гидрологический институт,

199053, С.-Петербург, 2-я Линия В.О., 23, Россия; [oleg@oa7661.spb.edu](mailto:oleg@oa7661.spb.edu)

\*\* Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации,  
Мировой центр данных, 249035, Обнинск, ул. Королева, 6, Россия; [artra@mail.ru](mailto:artra@mail.ru)

Исследовано влияние природно-климатических факторов на современные изменения криолитозоны. Выделены три главных фактора: температура воздуха, сумма атмосферных осадков за холодный период и динамика растительности, которые оказывают влияние на состояние мерзлых пород 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, сезонный слой, изменчивость, вероятностно-статистический прогноз*

EVALUATING THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL FACTORS  
ON PERMAFROST IN RUSSIA

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

\* State Hydrological Institute, 199053, St.-Petersburg, Second Line V.O., 23, Russia; [oleg@oa7661.spb.edu](mailto:oleg@oa7661.spb.edu)

\*\* All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information,  
World Data Center, 249035, Obninsk, Korolev str., 6, Russia; [artra@mail.ru](mailto:artra@mail.ru)

The effect of the environmental factors on permafrost has been studied. Three main factors, namely: the air temperature, the accumulated amounts of solid precipitation, and the vegetation dynamics, which govern the state of the frozen ground at time scales from few years to decades, are identified. The quantitative evaluation of their effect on the soil temperature variations and the construction of the conceptual model for predicting permafrost dynamics under the current and expected for the future climatic conditions, which accounts for the cumulative effect of major governing factors, have been carried out.

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

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными наблюдениями выявлены изменения криолитозоны, начавшиеся во второй половине XX в., 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,b]. Данные об изменении климати-

ческих параметров на сети метеостанций России представлены на интернет-портале ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД" [<http://www.meteo.ru>]. Результаты их анализа приведены в ежегодных докладах Росгидромета об особенностях климата [Доклад..., 2015], а также во Втором оценочном докладе об изменении климата на территории России [Второй... доклад..., 2014]. Анализ данных о современной динамике растительности бореальной и тундровой зоны выполнен в [ACIA, 2005; IPCC, 2014]. Динамика растительности на терри-

тории России анализируется в публикациях [Чебакова, Парфенова, 2006; Анисимов и др., 2015]. Из цитируемых выше работ 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..., 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 [Там же]. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения.

Перечисленные факторы оказывают сильное влияние на все элементы криосферы. В период 1978–2014 гг. минимальная площадь морских льдов в Северном полушарии уменьшалась в среднем на  $13.3 \pm 2.8\%$  за каждые 10 лет. Часть его таяла в пределах арктического бассейна, а до 10 % от общей площади выносилось через пролив Фрама в Атлантику. В период 2003–2008 гг. в среднем за год вынос составлял  $(699 \pm 112) \times 10^3\text{ км}^2$  [Kwok et al., 2009]. В период 1967–2012 гг. на 53 % сократилась площадь снежного покрова в Северном полушарии в июне. Данные за более длительный период 1922–2012 гг. указывают на сокращение площади снега на 7 % в марте и апреле, в соответствии с ростом температуры воздуха этих месяцев, осредненной по широтной зоне  $40\text{--}60^{\circ}$  с.ш. Повсеместно происходит уменьшение массы ледников. Оно составляло  $226 \pm 135\text{ Гт}$  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].

Важным элементом криосферы являются многолетнемерзлые грунты (ММГ). Они занимают 9–12 % площади всех континентов ( $13.2\text{--}18.0\text{ млн км}^2$ ), а вся криолитозона, в которую входят также области прерывистого и островного распространения, – 23–25 % суши [Gruber, 2012]. В России ММГ имеют сплошное распространение на площади в 7 млн  $\text{км}^2$ , на 1.8 млн  $\text{км}^2$  – прерывистое и на 2.5 млн  $\text{км}^2$  – островное и редкоостровное [Анисимов и др., 2012]. Для России изменения криолитозоны особенно важны, поскольку они представляют угрозу для инфраструктуры [Анисимов, 2010; Nelson et al., 2001, 2002]. Зафиксированы многочисленные разрушения объектов из-за деградации ММГ [Анисимов, Лавров, 2004; Алексеева и др., 2007; Гребенец, 2007; Гребенец, Ухова, 2008; Хрусталева и др., 2011; Instanes et al., 2005; Streletskiy et al., 2012, 2014].

Данные о состоянии криолитозоны России в различное время пополнялись из четырех источников. Самые продолжительные наблюдения за температурой почвы выполнены на метеостанциях Росгидромета до глубины 3.2 м [Шерстю-

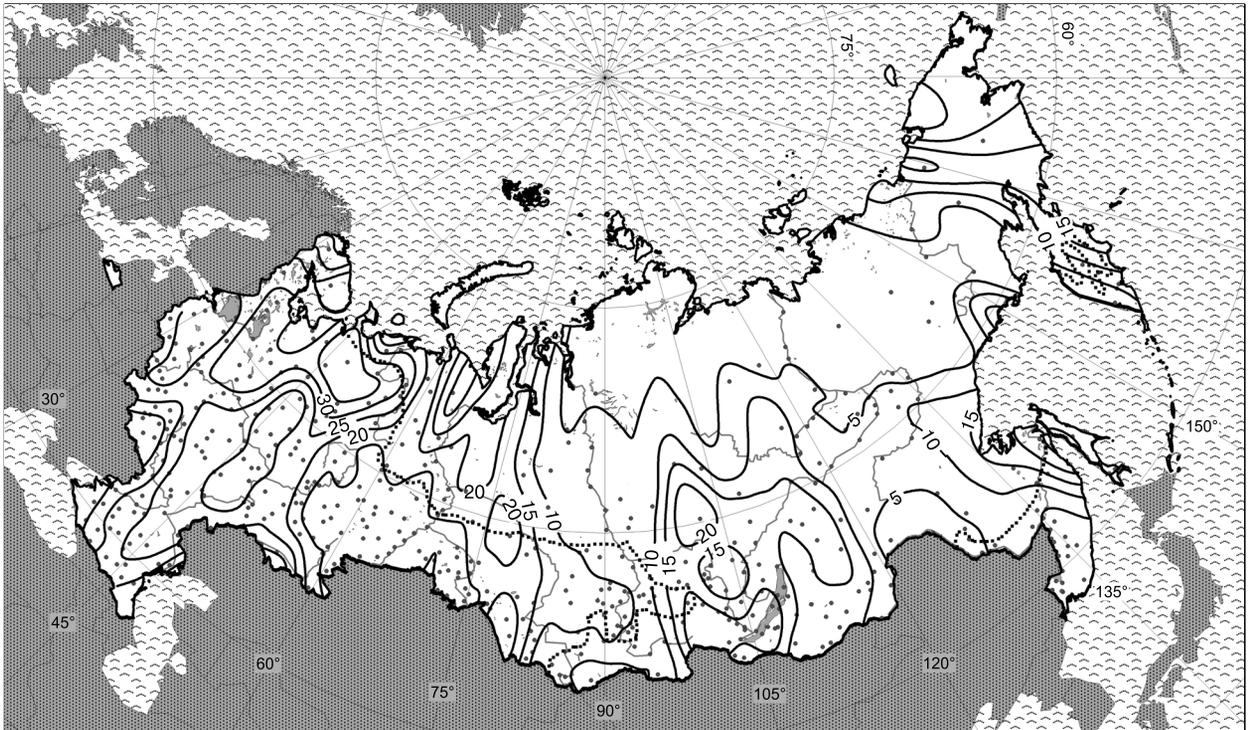
ков А.Б., Шерстюков Б.Г., 2015; Frauenfeld et al., 2004]. Данные по многим станциям имеются на портале [<http://www.meteo.ru>]. Еще один источник данных – геотермические измерения в скважинах различной глубины – от первых десятков до сотен метров [Сергеев и др., 2007]. В России задействованы более 160 скважин, данные имеются на портале [<http://gtnp.arcticportal.org/>]. С 1990 г. в рамках программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя (Circumpolar Active-layer Monitoring, CALM) проводятся измерения мощности сезонноталого слоя (СТС). 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.gwi.edu/~calm](http://www.gwi.edu/~calm)]. Наиболее детальные наблюдения выполняются на специализированных мерзлотных стационарах. В последующих разделах данные наблюдений используются для изучения влияния климатических факторов и растительности на термический режим ММГ на территории России.

#### ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

Интегрирующим показателем состояния ММГ является среднегодовая температура на глубине ниже СТС. В работах [Шерстюков, 2008, 2009] рассматривалось влияние температуры воздуха и высоты снежного покрова на температуру грунта. Было показано, что на Европейской территории России (ЕТР) основной вклад вносит температура воздуха, а на остальной территории – высота снежного покрова. Позднее эти выводы подтверждены в статье [Park et al., 2014] с использованием продленных до 2011 г. данных. С учетом этих результатов, выявивших два главных климатических фактора, в настоящей работе анализируется полный объем наблюдений на сети метеостанций России за период 1966–2012, на основе которых рассчитывается вклад температуры воздуха и снежного покрова в вариацию среднегодовой температуры грунтов. Результаты расчета используются для построения карты уязвимости мерзлоты при изменении климата. В расчетах вместо реальных величин высоты снега использовались измеряемые на метеостанциях суммы твердых осадков, а для оценки вклада каждого фактора – частные коэффициенты корреляции, определяемые следующими уравнениями:

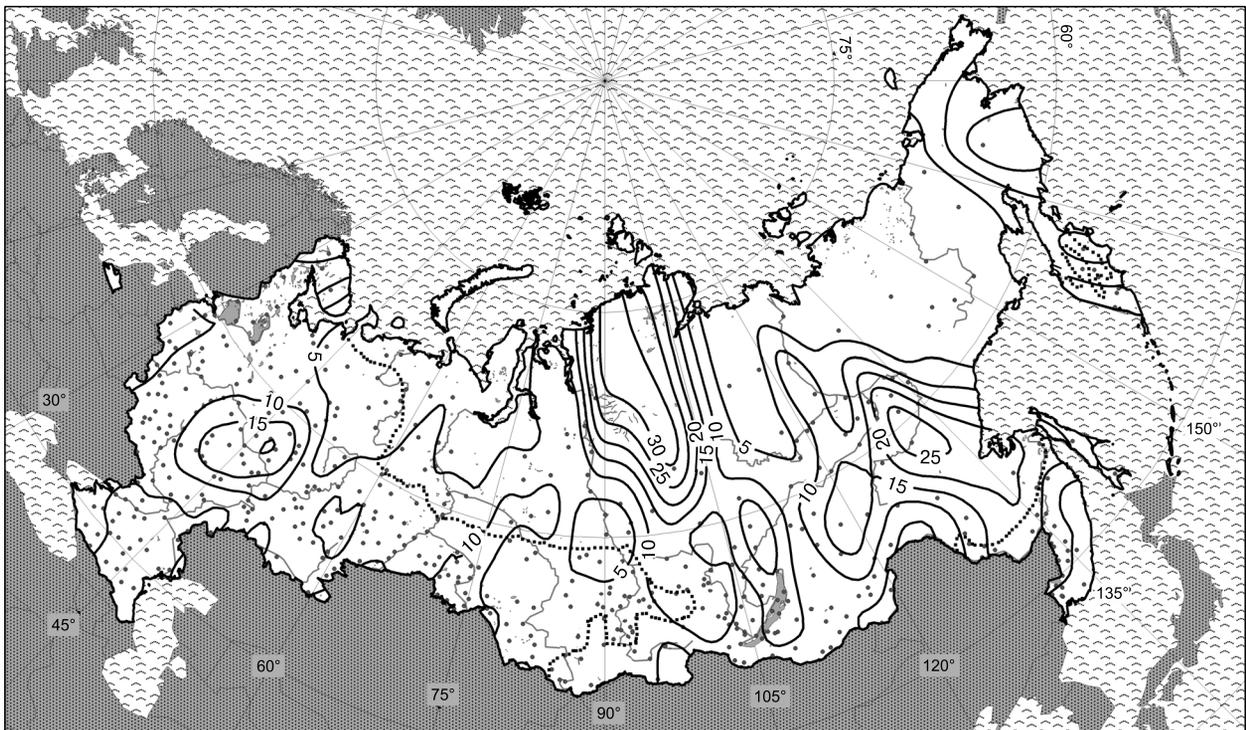
$$D_{12} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}}, \quad (1)$$

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



**Рис. 1.** Вклад температуры воздуха (%) в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см.

Здесь и на рис. 2, 3 пунктирной линией обозначена южная граница криолитозоны.



**Рис. 2.** Вклад суммы твердых осадков в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см.

Здесь  $D_{12}$  – частный коэффициент корреляции между температурой грунта и воздуха при исключении 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 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. 1 и 2.

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

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

Этот показатель отклика ММГ на изменения температуры воздуха использовался в ряде предшествующих работ [Израэль и др., 2006; Павлов, Малкова, 2009; Анисимов и др., 2012]. При вычислении  $K_{\text{ММГ}}$  нами были отобраны метеостанции со

статистически значимым (достоверность >95 %) трендом температуры воздуха. Построенная по данным за период 1966–2012 гг. карта уязвимости ММГ показана на рис. 3.

В силу того, что предшествующие работы [Израэль и др., 2006; Павлов, Малкова, 2009; Анисимов и др., 2012] выполнялись 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 территории Российской Федерации (долгота ( $\lambda < 60^\circ$  в.д.); Западная Сибирь ( $60^\circ < \lambda < 90^\circ$ ); Восточная Сибирь ( $90^\circ < \lambda < 130^\circ$ ); Дальний Восток ( $\lambda > 130^\circ$ ). На большей части ЕТР  $K_{\text{ММГ}}$  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 отмечены 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.

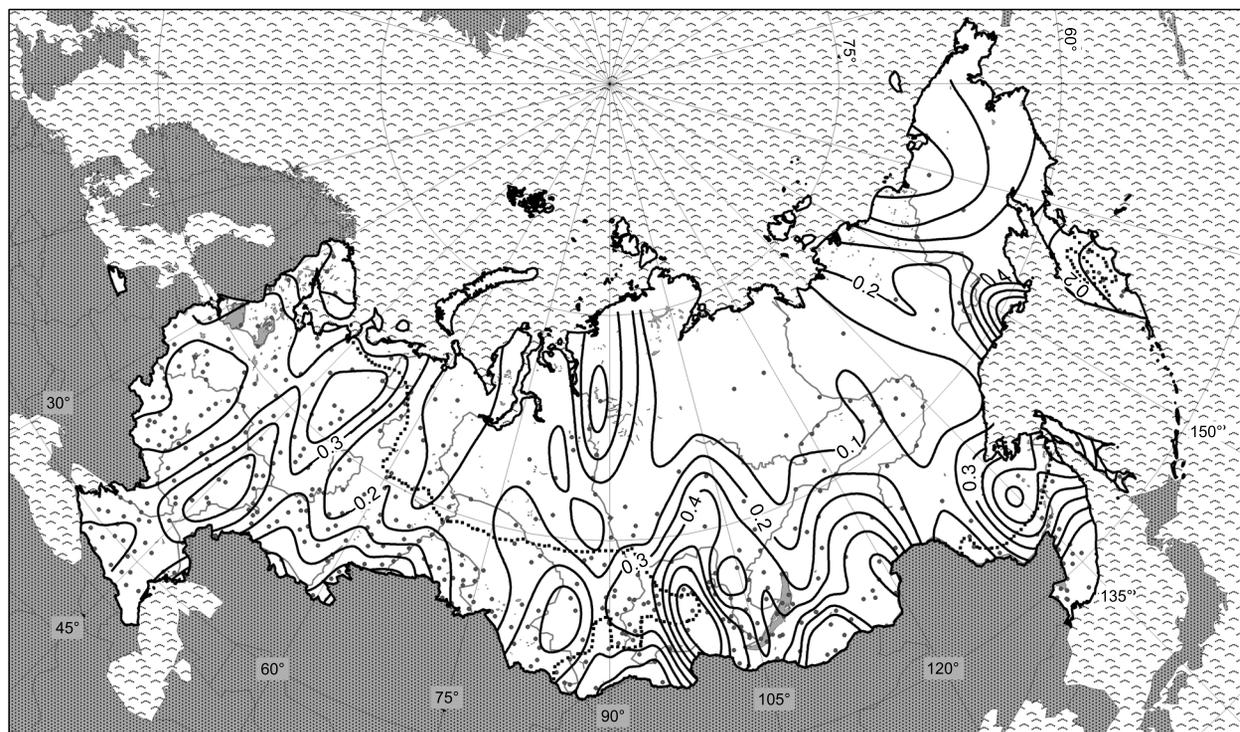
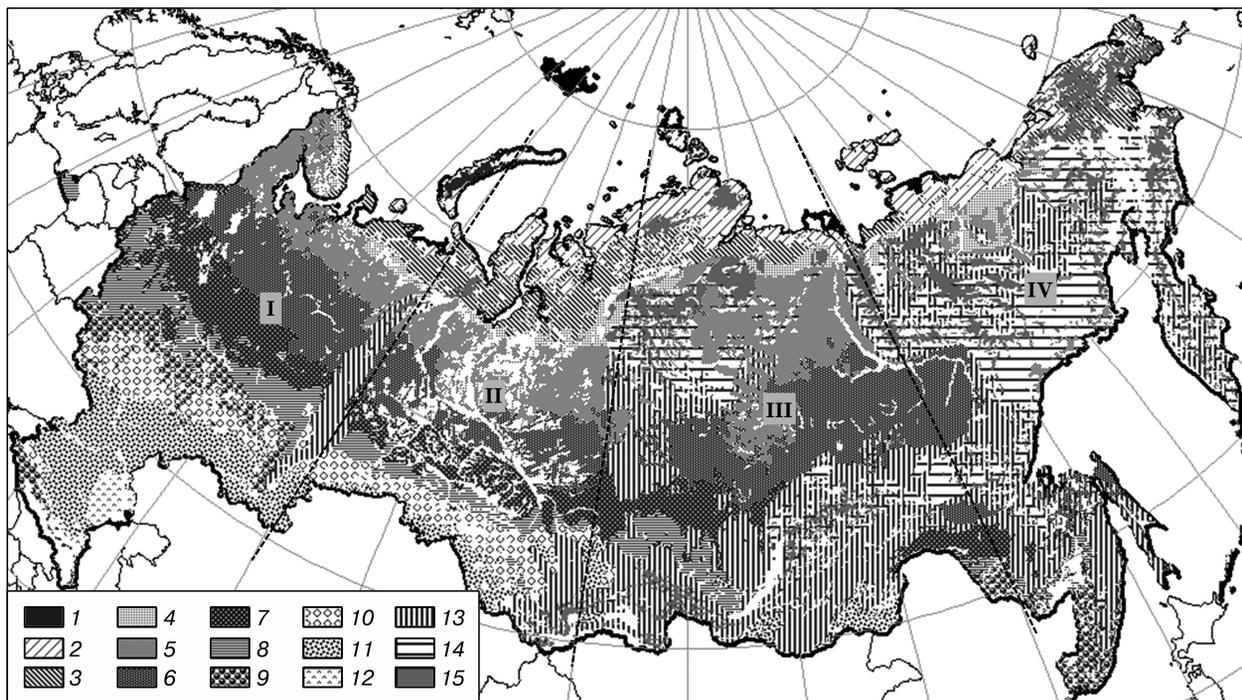


Рис. 3. Пространственное распределение коэффициента уязвимости многолетнемерзлых грунтов к современным изменениям климата на территории России.



**Рис. 4. 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 секторы: 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.

В Восточной Сибири наиболее надежные выводы можно сделать по ее южной части, так как здесь сосредоточено наибольшее количество метеостанций. В Иркутской области, западнее оз. Байкал,  $K_{\text{ММГ}}$  находится в пределах от 0.3 до 0.5. В Республике Бурятия и Забайкальском крае  $K_{\text{ММГ}}$  составляет от 0.4 до 0.5, местами – до 0.7. Таким образом, ММГ на обширной территории вокруг оз. Байкал обладают высокой уязвимостью к изменениям климата. На севере Восточной Сибири коэффициент уязвимости наблюдается в пределах от 0.1 до 0.3, однако для надежных выводов на данной территории недостаточно станций.

На Дальнем Востоке и в Якутии  $K_{\text{ММГ}}$  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 Вилюя, Лены и Алдана. В Хабаровском крае вблизи границы ММГ, а также в примыкающей Сахалинской области  $K_{\text{ММГ}}$  составляет от 0.3 до 0.6, что свидетельствует о высокой уязвимости ММГ. В Чукотском автономном округе  $K_{\text{ММГ}}$  варьирует 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...0.3 – низкая; 0.3...0.4 – средняя; >0.4 – высокая уязвимость, выделяя соответствующие районы ММГ России.

#### УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ГРУНТОВ

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 – утепляющий, поскольку снег является хорошим теплоизолятором.

Растительность, в особенности низший мохово-торфяной слой (его часто отождествляют с органическим слоем), служит 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 варьируют 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, что ведет к уменьшению их температуры и мощности СТС. Подобная зависимость биомассы от теплообеспеченности наблюдается и в остальных 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, которое также 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 (травами и злаковыми). В типичной и южной тундре индикаторами изменения биомов являются экспансия кустарников и смещение границы леса. Изменения состава биомов могут оказывать как утепляющее, так и охлаждающее воздействие. Так, кустарники хорошо удерживают снег и способствуют большему снегонакоплению, в результате температура ММГ в зимний период увеличивается. В то же время интродукция высших растений приводит к большему 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 о повышении 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 теплообеспечен-

ность 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 [Hickling et al., 2006; Gonzalez et al., 2010] 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]. Согласно прогнозным расчетам по динамическим моделям, эти процессы будут усиливаться, и в XXI в. 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 к сложному пространственному распределению коэффициента уязвимости. 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 воздушнo- и почвенно-мерзлотные индексы, N-факторная модель, T-Тор и подобные им. Обзор таких моделей дан в статье [Riseborough et al., 2008]. Для устранения этой проблемы моделирование ММГ необходимо проводить с учетом изменений растительности.

Авторами была построена эмпирико-статистическая модель, связывающая границы распространения биомов с климатическими индексами теплообеспеченности 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) суммой температур выше 5 °C ( $\Sigma T > 5$  °C), которая характеризует температурный режим вегетационного периода, а также неявно учитывает

**Доли территории (%), на которых прогнозируется изменение типа биомов к первой четверти (среднее за 2016–2045 гг.) и к середине (2031–2060 гг.) XXI в.**

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

изменение мощности СТС в области криолитозоны, поскольку она (в первом приближении) связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур;

2) суммой температур ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Sigma T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), т. е. суровостью зим;

3) индексом увлажнения, равным отношению суммы температур выше  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  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. 4).

Были рассчитаны значения трех климатических индексов-предикторов, осредненные за период 1901–1980 гг., в течение которого сформировалась современная растительная зональность. Далее была выполнена ординация биомов в пространстве индексов-предикторов и определены интервалы значений индексов для каждого биома. Ординация проводилась отдельно для четырех секторов на территории России. Модель использовалась совместно с ансамблевой климатической проекцией на основе гидродинамических моделей последнего поколения СМР5 для того, чтобы рассчитать смещение границ биомов в первой четверти и в середине XXI в. 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.

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 использовались данные измерений NDVI со спутников NOAA за период 1982–2012 гг., размещенные на портале [[http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh\\_ftp.php](http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_ftp.php)].

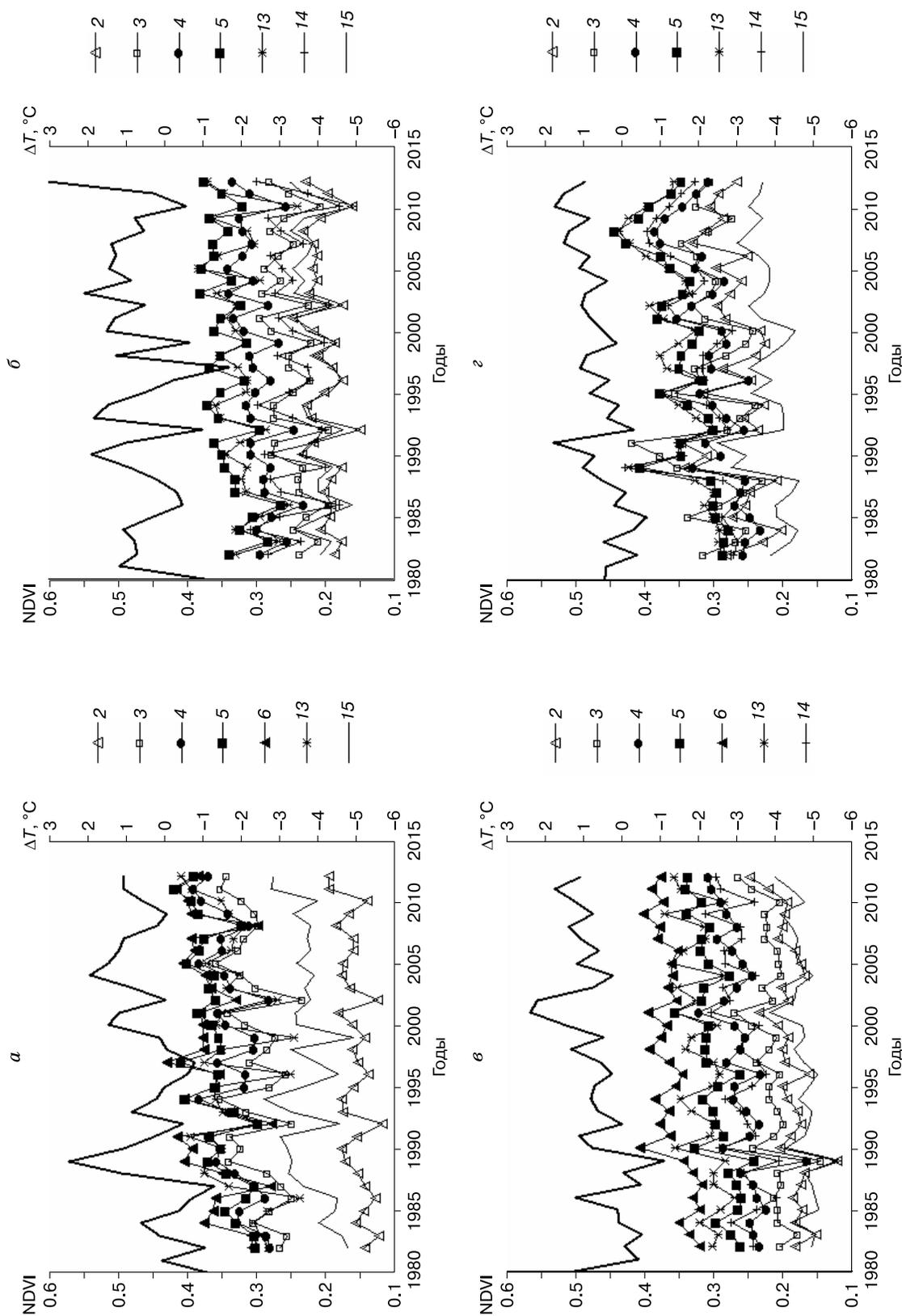
Изменения NDVI, осредненные по каждой из рассматриваемых растительных зон в четырех секторах Северной Евразии, показаны на рис. 5. В результате анализа выявлено наличие положительных корреляций этих изменений с температурой воздуха, осредненной за летний период, со значениями коэффициента корреляции до 0.70 [Анисимов и др., 2015]. Аномалии температуры показаны в верхней части рисунков. Ранее отмечалось, что увеличение фитомассы в полярной пустыне и 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 рис. 3 коэффициент уязвимости ММГ имеет сложное пространственное распределение, а связь изменений температуры воздуха и ММГ нелинейная.

## ВЫВОДЫ

Результаты анализа 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 специфичен для каждой зоны. При дальнейшем воздействии начнется конкурентное подавление и вытеснение одних видов и инвазия новых функциональных типов растений. Продуктивность об-



**Рис. 5. Изменения NDVI по растительным зонам в четырех секторах Российской Арктики:**

*a* – Европейская часть; *б* – Западная Сибирь; *в* – Восточная Сибирь; *г* – Дальний Восток. Обозначения растительных зон (1–15) те же, что и на рис. 4. Верхняя кривая показывает anomalies летней температуры воздуха по отношению к норме 1961–1990 гг., осредненной по соответствующим регионам, значения которой указаны на вертикальной оси справа ( $\Delta T$ ).

разумных новых растительных сообществ более не может быть описана регрессионными уравнениями, полученными по данным для изначальной растительной зональности. На сегодня это главное препятствие уменьшения неопределенности модельных прогнозов состояния ММГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00037). Разработка модели растительной зональности проводилась при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00072).

### 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 / О.А. Анисимова. М., 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 / Под ред. С.М. Семенов. М., НИЦ "Планета", 2012, с. 268–328.

**Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю.** Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса, 2015, № 3, с. 60–70.

**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.

**Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., ФГБУ "НИЦ "Планета", 2014, 58 с.

**Гребенец В.И.** Деформации объектов в криолитозоне при непрогнозируемых изменениях сложных инженерно-геокриологических условий оснований // Инж. 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. М., Росгидромет, 2015, 107 с.

**Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.** Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М., Планета, 2013, т. XXV, с. 360–374.

**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 // Вестн. МГУ. Сер. География, 2010, № 6, с. 49–57.

**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) // Там же, 2007, т. XI, № 2, с. 19–26.

**Хрусталева Л.Н.** Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата / Л.Н. Хрусталева, С.Ю. Пармузин, Л.В. Емельянова. М., Универ. 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.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79–87.

**Шерстюков А.Б.** Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России / А.Б. Шерстюков. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 2009, 127 с.

**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 // Метеорол. и гидрол., 2015, № 2, с. 5–12.

**ACIA** Arctic Climate Impact Assessment, United Kingdom, Cambridge, 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 // Environ. Res. Lett., 2011, vol. 6, No. 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 Interact., 2010, No. 14, doi: 10.1175/2010EI1315.1171.

**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, vol. 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 Biol., 2010, No. 16, p. 1542–1554.

**Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D.** Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia // J. Geophys. Res., 2004, vol. 109, No. D05101, doi:10.2929/2003JD004245

**Gonzalez 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 Ecol. and Biogeogr., 2010, No. 19, p. 755–768.

**Gruber S.** Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere, 2012, vol. 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 Biol., 2006, No. 12, p. 450–455.

<http://www.meteo.ru> (дата обращения: 12.03.2015).

- <http://gtnp.arcticportal.org/> (дата обращения: 12.03.2015).
- [http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh\\_ftp.php](http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_ftp.php) (дата обращения: 12.03.2015).
- Instanes A., Anisimov O., Brigham L. et al.** Infrastructure: Buildings, Support Systems, and Industrial Facilities // ACIA Arctic Climate Impact Assessment, United Kingdom, Cambridge, Cambridge Univ. 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 / Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al.** Cambridge, United Kingdom and N.Y., N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013a, 1535 p.
- IPCC Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Pt B: Regional Aspects // Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, United Kingdom and N.Y., N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2014, 688 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 / Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al.** Cambridge, United Kingdom and N.Y., N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013b, p. 1–30.
- Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D.** Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // *J. Geophys. Res.-Oceans*, 2009, vol. 114, C07005, p. 1–16, DOI: 10.1029/2009JC005312.
- Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I.** Subsidence risk from thawing permafrost // *Nature*, 2001, No. 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, vol. 26, No. 3, p. 203–225.
- Park H., Sherstiukov A.B., Fedorov A.N. et al.** An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia // *Environ. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, No. 6, URL: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/9/6/064026> (дата обращения: 09.06.2015).
- 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, vol. 3, p. 673–677.
- 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 Lett.*, 2012, vol. 3, No. 5, p. 403–411.
- Riseborough D., Shiklomanov N., Eitzelmuller B. et al.** Recent advances in permafrost modelling // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, vol. 19, No. 2, p. 137–156.
- Streletskiy D.A., Anisimov O.A., Vasiliev A.A.** Permafrost degradation // *Snow and ice-related risks, hazards, and disasters / Ed. by W. Haeberli, C. Whiteman.* Oxford, Elsevier, Acad. Press, 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 Res.*, 2012, vol. 44, No. 3, p. 368–380.
- 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, vol. 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 / Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al.* Cambridge, Cambridge Univ. 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 // *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, No. 015504, p. 1–17.
- [www.gwu.edu/~calm](http://www.gwu.edu/~calm) (дата обращения: 15.03.2015).
- Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S. et al.** Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, p. 581–586.

Поступила в редакцию  
13 апреля 2015 г.