

# Прикладные проблемы

УДК 551.5

doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-243-254

## Воздействие потепления на дискомфортность жизнедеятельности населения Арктической зоны Российской Федерации

© 2018 г. А.Н. Золотокрылин\*, В.В. Виноградова, И.А. Соколов

Института географии РАН, Москва, Россия

\*azolotokrylin1938@yandex.ru

## Climate change and the human life conditions in the Arctic Zone of the Russian Federation

A.N. Zolotokrylin\*, V.V. Vinogradova, I.A. Sokolov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*azolotokrylin1938@yandex.ru

Received August 26, 2017

Accepted December 12, 2017

**Keywords:** *Arctic zone of the Russian Federation, climate warming, discomfort, model forecasts, natural conditions of the human population, regionalization of Russia.*

### Summary

The present-day global warming and the rise of climate extremes are the most pronounced in the Arctic zone of the Russian Federation, and this circumstance is very important for the population of these regions. According to the zoning of the territory of Russia presenting the natural conditions of the human's life, the greater part of the Arctic zone of the Russian Federation is characterized by absolutely unfavorable and very unfavorable conditions. In this connection, estimation of the present-day climate conditions and prediction of future situation is very important for the population in many regions of Russia, and particularly in the Arctic zone. The Nature conditions of human life in the second half of the 20<sup>th</sup> century and changes of them in the 21<sup>st</sup> one were analyzed in this work. This made possible to correct the map "Zoning of the territory of the Russian Federation on natural conditions of the human's life" and to estimate possible changes of climate conditions by the middle of the 21<sup>st</sup> century. The results of numerical experiments performed with three models presented at the fifth phase of the coupled models comparison Project (Coupled Model Inter-comparison Project, SMIR5) were used in the work. The models are as follows: one of the Institute of Numerical Mathematics of RAS (INMCM4); the second - Meteorological Office of the Hadley Center (HadGEM2-ES), and the third - Max-Planck Meteorological Institute (MPI-ESM-LR). The most changeable climatic factors (heat, cold, and wind) were investigated. The regions of the Arctic zone of the Russian Federation, where warming is the most evident, have been established, and changes of areas with different levels of climatic discomfort during periods of current and expected climate warming have been estimated. The warming of 1991–2010 in the Western and Eastern parts of the Arctic zone of the Russian Federation resulted in that area with absolutely unfavorable conditions significantly decreased. The scale of the area reduction was found to be comparable to the change of discomfort under the «soft» anthropogenic scenario for the period 2046–2055.

**Citation:** Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Sokolov I.A. Climate change and the human life conditions in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018. 58 (2): 243–254. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-243-254

Поступила 26 августа 2017 г.

Принята к печати 12 декабря 2017 г.

**Ключевые слова:** *Арктическая зона Российской Федерации, дискомфорт, модельные прогнозы, потепление климата, природные условия жизни населения, районирование России.*

Продолжающееся глобальное потепление сильнее всего выражено в Арктической зоне. Большая часть Арктической зоны Российской Федерации характеризуется абсолютно неблагоприятными и очень неблагоприятными условиями жизнедеятельности населения. В результате потепления в западной и восточной частях этой зоны значительно сократилась площадь с абсолютно неблагоприятными условиями. Масштаб такого сокращения сравним с изменением дискомфорта при «мягком» антропогенном сценарии для периода 2046–2055 гг.

## Введение

Понятие Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) закреплено в документе «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», утверждённом Президентом России 20 февраля 2013 г. [1]. Территория Арктической зоны Российской Федерации определена в «Приложении» к Указу Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации». Документ направлен на решение основных задач государственной политики Российской Федерации в Арктике в рамках стратегического планирования социально-экономического развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности России. Вклад географической науки в подготовку этого документа состоит в разработке предложений об уточнении географических границ Арктической зоны, в том числе её южной границы, с перечнем и статусом муниципальных образований, входящих в её пределы [2].

Материалы к обоснованию границы Арктики как физико-географического объекта для определения южной границы АЗРФ рассмотрены в работе [3] и базируются на анализе современных знаний о природе арктических территорий России. В ней анализируется эволюция определения «Арктики» как физико-географического объекта и признано, что оно вполне соответствует современным физико-географическим представлениям. Особое внимание уделено составлению перечня отличительных природных признаков (критериев) Арктики, которые в дальнейшем используются для определения разных вариантов её южной границы.

Новый элемент общепринятого зонирования Арктики — характеристика природных условий вдоль предполагаемых вариантов её южной границы. Суть многовариантного подхода состоит в том, что в качестве основного физико-географического индикатора географической границы Арктики (в пределах сухопутной территории) рассматриваются природные ландшафтные зоны (тундра, арктическая пустыня, ледники). В соответствии с этим индикатором на равнинной территории южная граница тундровой зоны принимается в качестве южной границы Арктики. В итоге южная граница АЗРФ совпадает с географической границей природной системы Арктики, однако административ-

ная граница АЗРФ проходит по границам муниципальных образований, включённых в АЗРФ.

Продолжающееся глобальное потепление и рост экстремальности климата сильнее всего выражены в Арктической зоне Российской Федерации, что воздействует на все компоненты природной среды. Здесь, начиная с 1976 г., отмечается наибольшее в стране повышение среднегодовой температуры (более 0,5 °C за 10 лет) [4]. Максимальные коэффициенты трендов среднегодовой температуры (0,8–0,9 °C за 10 лет) наблюдались на Таймыре. Коэффициент 0,7 °C за 10 лет отмечался на побережье Восточно-Сибирского моря. Полуострова Таймыр и Кольский отличались наибольшими скоростями потепления зимой. Напротив, в восточной части АЗРФ зимой происходило похолодание. Скорость летнего потепления составляла 0,8–1,0 °C за 10 лет на большей части АЗРФ, за исключением Кольского полуострова. Изменение среднесезонной температуры приземного воздуха в периоды 2041–2060 гг. по отношению к концу XX в. летом и зимой устанавливалось по оценкам ансамбля из 31 модели СМIP5 для сценария RCP4.5 [4]. В АЗРФ ожидается потепление зимой на 3–4 °C по сравнению с концом XX в. Оно будет заметно превышать летнее потепление [4].

Существенная особенность ландшафтов арктических пустынь — широкое распространение современного оледенения. Ледниками покрыто около 30% площади всех островов Северного Ледовитого океана в АЗРФ [4]. Современное оледенение в арктической тундре развито значительно слабее, чем на островах арктических пустынь. Деграция оледенения арктических островов и горного оледенения в АЗРФ стала доминирующей тенденцией. Например, оценки объёмов льда в ледниках Земли Франца-Иосифа в 1952 и 2001 гг. показывают их сокращение в среднем на 3,33% за этот период [5]. При этом айсберги составляют заметную долю сокращения объёмов ледников по сравнению с тальми водами. Если брать все ледники Земли Франца-Иосифа, то за период 2003–2009 гг. их высота в среднем снизились на 0,5–0,6 м [5]. В то же время поверхность привершинных частей ряда куполов повышается.

В АЗРФ устойчивее всего оледенение сокращается в её западной и центральной частях, находящихся под влиянием Атлантики. Так, ледники Кольского полуострова и Ямала исчезли ещё несколько десятилетий назад [4]. Ледники Полярно-

Таблица 1. Численность, прирост и плотность населения в субъектах Арктической зоны Российской Федерации на 1 января 2017 г. [8]

Субъект Федерации, полностью или частично входящий в АЗРФ	Численность населения, тыс. чел.	Естественный прирост населения, чел. (2016 г.)	Миграционный прирост населения, чел. (2016 г.)	Плотность населения, чел./км <sup>2</sup>
Мурманская область	757,6	-209	-4343	5,2
Ненецкий АО	43,9	419	-320	0,2
Ямало-Ненецкий АО	536,0	5436	-3491	0,7
Чукотский АО	49,8	181	-516	0,1
Республика Коми, районы:	850,5	655	-6932	2,0
Воркутинский	<b>80,1*</b>			3,3
Республика Саха (Якутия), районы:	962,8	7299	-4153	0,3
Анабарский	3,5**			0,06
Булунский	8,4			0,04
Усть-Янский	7,2			0,06
Аллаиховский	2,7			0,03
Нижнеколымский	4,3			0,05
Красноярский край, районы:	2875,3	3983	4828	1,2
Туруханский	16,3			0,08
Долгано-Ненецкий	32,3			0,04
Архангельская обл., районы:	1121,8	-2161	-6266	2,7
Онежский	30,7			1,29
Приморский	25,6			0,56
Мезенский	9,1			0,26

\*Жирный шрифт – убыль населения; \*\*цифры, выделенные курсивом, – рост населения.

го Урала и Таймыра потеряли четверть своей площади после 1960-х годов. Растаяли ледники гор Путорана вблизи Норильска. Площадь ледников в горах Сунтар-Хаята, хр. Черского и на Меньпильгинском хребте после 1960-х годов также резко сократилась [4]. Потепление вызвало значимые изменения продолжительности залегания снежного покрова, которая в Европейской части и в Западной Сибири сокращается в результате уменьшения количества твёрдых осадков. Незначительное увеличение продолжительности залегания снежного покрова отмечается на Дальнем Востоке и связано с ростом объёма твёрдых осадков [6].

Режимные наблюдения вдоль Западно-Сибирского геофизиологического трансекта (от Земли Франца-Иосифа до г. Надым) показали, что в большинстве криогенных ландшафтов за последние 35–40 лет повысилась температура многолетнемерзлых пород [7]. На территории от подзоны типичной тундры до подзоны лесотундры повышение составило 1,5–2,5 °С. Правда, в арктической тундре температура многолетнемерзлых пород стабильна. На ряде площадок, где измере-

ния глубины протаивания ведутся более 30 лет, наблюдается явный колебательный характер изменения сезонно-талого слоя и тренд изменения глубины протаивания практически равен нулю [8]. С потеплением связано и усиление деструктивных криогенных процессов на льдистых берегах арктических морей [9]. Хозяйственные объекты, транспортная и трубопроводная инфраструктура, расположенные на многолетней мерзлоте в АЗРФ, испытывают преимущественно негативное воздействие современного потепления. Однако есть и положительный отклик на потепление – уменьшение протяжённости и толщины арктических морских льдов, что позволяет России сохранить контроль над плаванием судов в пределах экономической зоны при условии сохранения и развития отечественного ледокольного флота [4].

В Арктической зоне Российской Федерации проживает и работает значительная часть населения – более 1600 тыс. человек (табл. 1), но плотность населения здесь очень мала. Кроме того, в большинстве субъектов в последние десятилетия отмечается сокращение населения как за счёт

отрицательного прироста, так и в результате миграционного оттока [10]. В некоторых субъектах (Ненецкий, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа) естественный прирост населения в последние годы положителен, но также наблюдается и миграционный отток населения [10]. Очевидно, что на сокращение населения в АЗРФ влияют не столько климатические условия, сколько социально-экономическая ситуация, определяемая недостаточным финансированием. Поэтому происходящее потепление, а также улучшение социально-экономической ситуации и финансирования могут создать условия для прекращения оттока населения и развития этих территорий.

Согласно районированию территории России по природным условиям жизнедеятельности населения в климатический период 1961–1990 гг., большая часть АЗРФ в её административных границах характеризуется *абсолютно неблагоприятными* (арктические и частично тундровые ландшафты) и *очень неблагоприятными условиями* (тундровые, лесотундровые и в некоторой степени северотаёжные ландшафты) [3].

Природные условия обитания в *арктических ландшафтах* оцениваются как экстремальные, а основной фактор природного дискомфорта – экстремально низкая теплообеспеченность. Здесь наблюдается очень суровая и длительная зима, с сильными продолжительными ветрами и метелями, с коротким холодным летом. Арктические ландшафты отличаются самым продолжительным периодом ультрафиолетовой недостаточности (до 5 месяцев) и наименьшей повторяемостью благоприятной для организма человека погоды. Это – специфический арктический тип среды, где пришлому населению трудно приспособиться к жизни и деятельности. Эмоциональное состояние человека, долго живущего здесь, нуждается в реабилитации по истечении определённого периода. Согласно медико-географическим показателям, оптимальный срок проживания пришлого населения в этих условиях – 1–2 года. Формирование постоянного населения здесь не рекомендуется.

Для *тундровых и лесотундровых ландшафтов* также свойственны значительный недостаток тепла и избыток влаги. Здесь меньшая продолжительность периода ультрафиолетовой недостаточности (3–5 месяца) и большая повторяемость (до 20%) благоприятной для человека погоды. Но и в тундре, и в лесотундре сохраняется крайне интенсивное

воздействием на здоровье человека, с критическим напряжением адаптационных систем переселенцев, с тенденцией к декомпенсации. При тех же преобладающих патологиях, что и в арктических ландшафтах, оптимальный срок жизни здесь несколько больше: на равнинах – 2–3 года, в горах – 1–2 года. Зона также непригодна для сплошного и массового заселения, исключая коренное население [3].

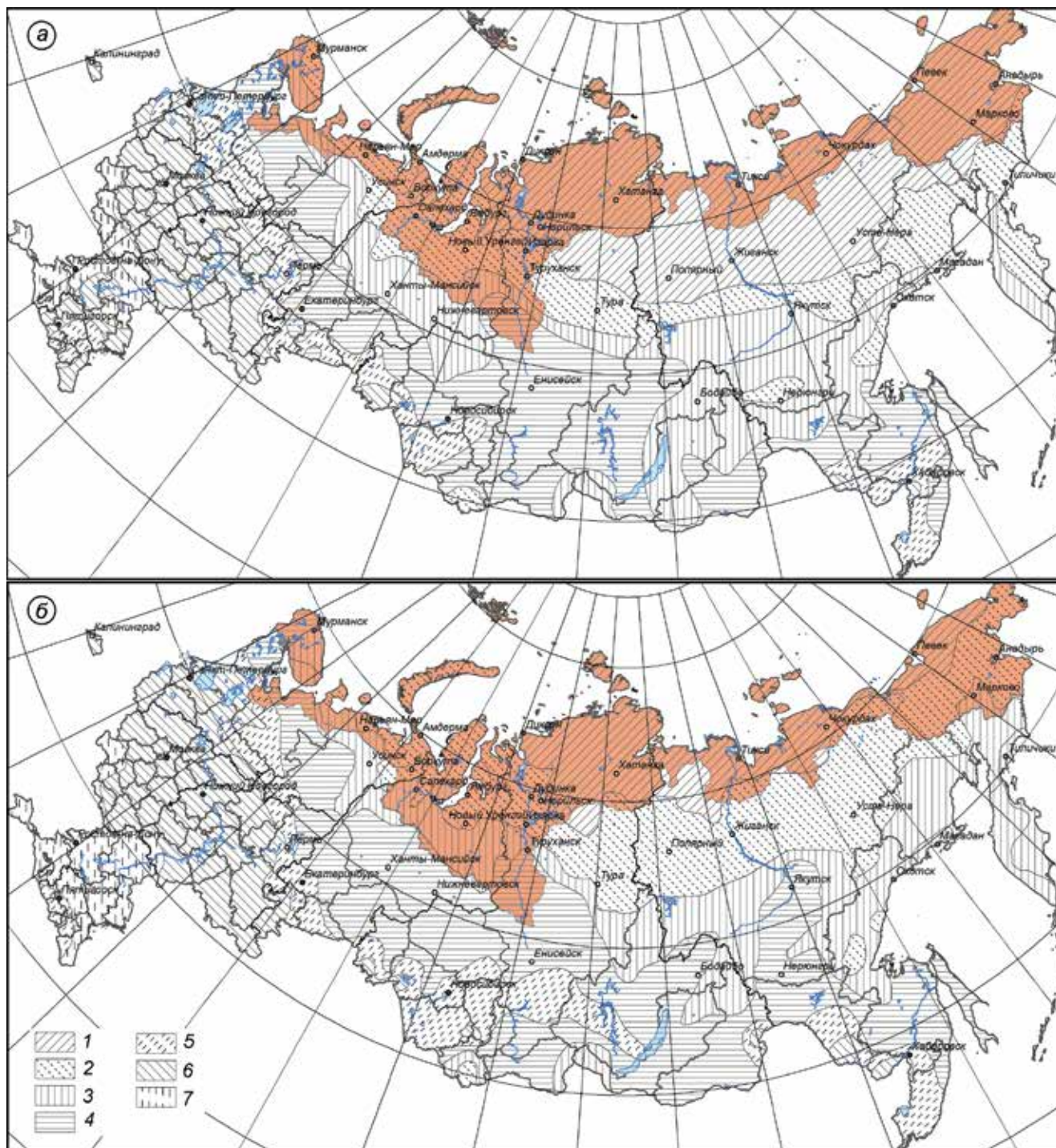
В АЗРФ входят также северные части неблагоприятной зоны, расположенные на территории *северотаёжных ландшафтов*. Адаптация пришлого населения здесь протекает с сильным напряжением адаптационных систем организма переселенцев, с постепенной компенсацией, а для пожилых людей и больных-хроников она бывает очень сложной и часто заканчивается декомпенсацией. Набор преобладающих патологий практически такой, как и в более северных зонах, но здесь они выражены несколько слабее. По природным условиям территории можно использовать для очагового заселения.

Воздействие потепления на жизнедеятельность населения в АЗРФ неоднозначно. Оценить это воздействие предлагается с помощью апробированной методики «балльной» оценки *природных условий жизнедеятельности населения* [3]. Как показывают наблюдения, интенсивность потепления на территории АЗРФ возрастает с широтой [4], что позволяет предположить неравномерное смещение границ зон дискомфорта к северу. При этом вероятно *сильное сокращение площади территорий с абсолютно неблагоприятными условиями и появление на их месте очень неблагоприятных*. В итоге площадь последней зоны может увеличиться, так как её южная граница смещается медленнее северной. Подобный эффект расширения зон дискомфорта возможен и в зонах, расположенных южнее. Задачи настоящей работы – исследование смещения границ зон дискомфорта и оценка изменения площадей с разным уровнем климатической дискомфорта в периоды современного и ожидаемого антропогенного потепления.

## Материалы и методика

Положение АЗРФ показано на рис. 1. По нашим оценкам, её площадь равна 3550 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет около 21% территории России. Дифференциацию зоны по степени климатиче-





**Рис. 1.** Карта «Районирование территории Российской Федерации по природным условиям жизни населения» для среднемноголетних условий (1961–1990 гг.) [2] (а) и для начала XXI в. (2001–2010 гг.) (б):

1 – абсолютно неблагоприятная зона; 2 – очень неблагоприятная зона; 3 – неблагоприятная зона; 4 – условно неблагоприятная зона; 5 – условно благоприятная зона; 6 – благоприятная зона; 7 – наиболее благоприятная зона. Арктическая зона Российской Федерации выделена оранжевым цветом

**Fig. 1.** Map «Zoning of the Russian Federation according to the natural conditions of the population life» for average conditions (1961–1990) (a), for beginning of the 21th century (2001–2010) (b):

1 – absolutely unfavorable zone; 2 – very unfavorable zone; 3 – unfavorable zone; 4 – conditionally unfavorable zone; 5 – conditionally favorable zone; 6 – favorable zone; 7 – mostly favorable zone. The Arctic zone of the Russian Federation is highlighted in orange

ской дискомфортности мы проводили на основе карты «Районирование территории Российской Федерации по природным условиям жизни населения» (масштаб 1:30 000 000), которая была подготовлена в лаборатории климатологии Института географии РАН [3, 11]. На карте дана интегральная балльная оценка степени природной дискомфортности для жизнедеятельности на территории России. Получение интегральной оценки природной дискомфортности в баллах состоит в вычислении в каждой точке градусной сетки среднего балла показателей зональных факторов с последующей их коррекцией с помощью азональных факторов.

К *зональным факторам* отнесены (показатели): астрономический (продолжительность дня и ночи); радиационный (ультрафиолетовая недостаточность—избыточность); холодовой (сумма отрицательных температур воздуха, продолжительность периода с температурой ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ , продолжительность отопительного периода); мерзлотный (мощность сезонно-талого слоя); тепловой (продолжительность безморозного периода, сумма температур за период с устойчивыми температурами выше  $+10^{\circ}\text{C}$ ); увлажнённости территории (вегетационный индекс NDVI); ветровой (индекс влажного ветрового охлаждения Хилла); изменчивость атмосферного давления (среднеквадратическое отклонение суточных величин давления). К *азональным факторам*: горный (абсолютная высота местности); заболоченность (относительная заболоченность территорий); стихийные явления (сейсмичность, наводнения, тайфуны, цунами) [3].

Карта «Районирование территории Российской Федерации по природным условиям жизни населения» создана для средних климатических условий (период 1961–1990 гг.). В настоящее время она адаптирована для периодов 1991–2000, 2001–2010 гг. и для модельных изменений климата в середине XXI в. (2046–2055 гг.). Для адаптации этой карты к современному климату применялись данные метеорологической сети [12]. В качестве исходных данных для оценки возможных изменений условий жизни населения в середине XXI в. использовались результаты численных экспериментов на глобальных климатических моделях Института вычислительной математики РАН INMCM4 с разрешением  $1,5^{\circ} \times 2^{\circ}$  [13, 14], Метеорологического офиса Хэдли Центра HadGEM2-ES, имеющих приблизительное разрешение  $2,5^{\circ}$  (широта)  $\times 2^{\circ}$  (долгота), и Метеорологического института

им. Макса Планка MPI-ESM-LR с разрешением  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  [15]. Используются результаты расчётов по двум сценариям – RCP4,5 и RCP8,5, согласно которым радиационный форсинг от увеличения концентрации парниковых газов к 2100 г. составит соответственно 8,5 и 4,5 Вт. Глобальное потепление по модельным расчётам к концу XXI в. составит 1,9 К для сценария RCP4,5 и 3,4 К для сценария RCP8,5. Это соответствует предположениям об отсутствии ограничения выбросов и умеренном ограничении выбросов [13–15]. Используются и суточные значения температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра за период 2046–2055 гг.

При адаптации карты «Районирование территории Российской Федерации по природным условиям жизни населения» для модельных условий анализировались быстро меняющиеся климатические факторы: термический, представленный тепловым и холодовым, а также ветровой для базового периода и середины XXI в. Оценка качества воспроизведения баллов дискомфортности, рассчитанных по данным моделей для базового климата, получена при помощи сравнения с расчётами по данным метеостанций для периода 1990–1999 гг. Средняя ошибка расчёта интегрального балла дискомфортности по модельным данным составила 4–8% для модели INMCM4, 2–6% для HadGEM2-ES и 2–5% для MPI-ESM-LR. Максимальные ошибки – соответственно 60, 43 и 44% – отмечаются на юге Европейской части России. При этом на большей части территории России интегральный балл дискомфортности, рассчитанный по данным моделей INMCM4 и MPI-ESM-LR, выше, а по данным модели HadGEM2-ES – ниже полученного по данным метеорологической сети. Максимальные ошибки отмечаются на юге России и не затрагивают АЗРФ. Но в целом, модели дают хорошие результаты расчёта интегрального балла дискомфортности и могут быть использованы для прогноза будущих изменений условий дискомфортности на территории России.

Мы анализировали карты дискомфортности жизнедеятельности населения на территории России, составленные по данным наблюдений для периодов 1961–1990, 1991–2000, 2001–2010 гг., и карты, построенные по результатам модельных расчётов для периода 2046–2055 гг. и сценариев RCP4,5 и 8,5. На каждой из этих карт в пределах АЗРФ вычислялись площади территорий с бал-

Таблица 2. Площади зон дискомфорта в Арктической зоне Российской Федерации при современном модельном потеплении климата

Периоды, годы	Зоны дискомфорта			
	абсолютно неблагоприятная	очень неблагоприятная	неблагоприятная	условно неблагоприятная
1961–1990	2293*/65	840/24	256/7	155/4
1991–2000	1938/55	1095/31	325/9	191/5
2001–2010	1436/41	1214/34	600/17	276/8
2046–2055:				
модель INMCM4, сценарий RCP4,5	1541/44	1221/34	498/14	282/8
модель MPI-ESM-LR, сценарий RCP4,5	1074/30	1889/53	370/10	217/6
модель HadGEM2-ES, сценарий RCP4,5	269/8	1673/47	779/22	753/21
модель INMCM4, сценарий RCP8,5	1057/30	1482/42	687/19	317/9
модель MPI-ESM-LR, сценарий RCP8,5	573/16	1838/52	611/17	528/15
модель HadGEM2-ES, сценарий RCP8,5	160/5	1639/46	600/17	1026/29

\*В числителе – данные в тыс. км<sup>2</sup>, в знаменателе – в %.

лами, соответствующими определённой степени природной дискомфорта жизнедеятельности. Построение карт и измерение площадей проводилось с использованием геоинформационных пакетов ArcGIS и QGIS. Ошибка измерения площадей с учётом математической основы и генерализации данных для Дальневосточного федерального округа составила 0,22%, для Сибирского – 0,72%, Уральского и Северо-Западного – 4,6 и 1,08% соответственно. Таким образом, средняя ошибка – меньше 1%, а максимальная (в Уральском федеральном округе) – не превышает 4,6%.

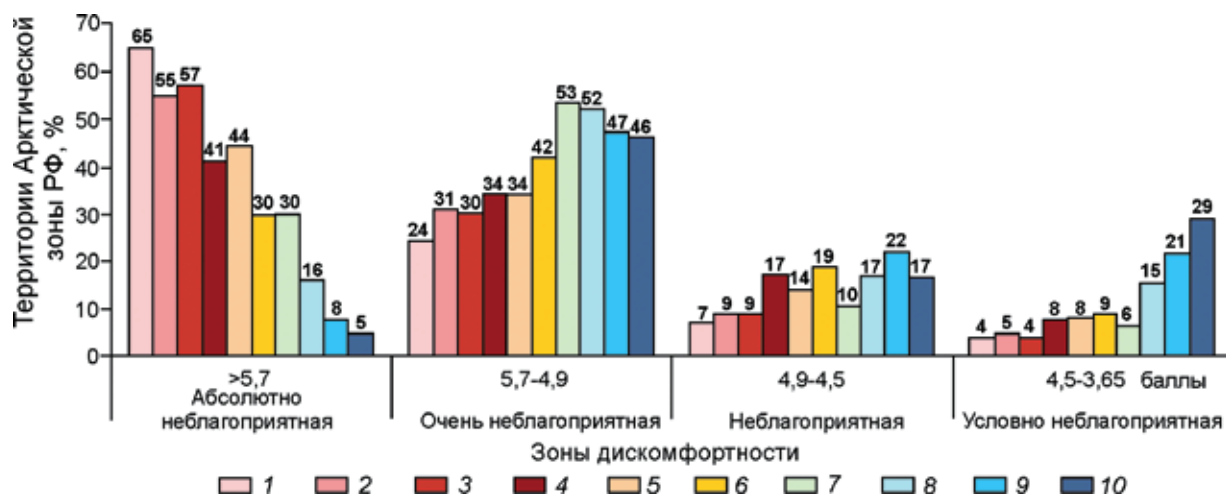
### Результаты исследования

Изменение площадей с разной степенью дискомфорта от периода 1961–1990 гг. к периоду современного потепления 2001–2010 гг. в АЗРФ и на не вошедших в неё территориях России показано на рис. 1. Из него видно, что ослабление климатической дискомфорта в результате потепления прежде всего характерно для западной части АЗРФ, прилегающей к Баренцеву морю, а также Ямало-Ненецкого автономного округа и Туруханского района Красноярского края. Климатическая дискомфортность снизилась и в южной части Чукотского автономного округа. Это вызвано увеличением повторяемости циклонов зимой и уменьшением их повторяемости в переходные сезоны и летом [4]. На данной территории отмечается также уменьшение сильных

ветров, которое в основном связано с сокращением повторяемости глубоких циклонов [16]. Летом происходят углубление барической ложбины на Арктическом фронте и усиление интенсивности циклонической деятельности над западными районами Баренцева моря, что вызывает смещение зоны наиболее частого прохождения циклонов на Арктическом фронте к северу на 2° широты [17].

Во все периоды большая часть АЗРФ – это территории с *абсолютно неблагоприятными* и *очень неблагоприятными* условиями. Для средне-многолетних условий (1961–1990 гг.) они суммарно занимают 89% зоны, для периода 1991–2000 гг. – 86%, а для современного периода 2001–2010 гг. – уже 75%. Ослабление дискомфорта происходило неравномерно. Так, в 1990-е годы наблюдалось уменьшение площади абсолютно неблагоприятных территорий (на 10%) в основном за счёт увеличения площади (на 7%) очень неблагоприятных территорий (более мягкая градация дискомфорта по сравнению с очень неблагоприятной) (табл. 2). В начале XXI в. отмечалось дальнейшее сокращение площади территорий с абсолютно неблагоприятными условиями (на 14%), расширение площадей с очень неблагоприятными (на 3%) и неблагоприятными условиями – более мягкая градация дискомфорта (на 9%). Однако в этот же период АЗРФ всё равно характеризуется преимущественно абсолютно неблагоприятными (41%) и очень неблагоприятными (34%) условиями.

Таким образом, в начале XXI в. произошло сокращение почти в 1,6 раза абсолютно неблаго-



**Рис. 2.** Площади зон дискомфорта при современном и модельном потеплении климата в Арктической зоне РФ:

Периоды 1 – 1961–1990 гг.; 2 – 1991–2000 гг.; 3 – 1990–1999 гг., модель INMCM4; 4 – 2001–2010 гг.; 5 – 2046–2055 гг., модель INMCM4, сценарий RCP4,5; 6 – 2046–2055 гг., модель INMCM4, сценарий RCP8,5; 7 – 2046–2055 гг., модель MPI-ESM-LR, сценарий RCP4,5; 8 – 2046–2055 гг., модель MPI-ESM-LR, сценарий RCP8,5; 9 – 2046–2055 гг., модель HadGEM2-ES, сценарий RCP4,5; 10 – 2046–2055 гг., модель HadGEM2-ES, сценарий RCP8,5

**Fig. 2.** The areas of zones of discomfort in modern and model climate warming in the Arctic zone of the Russian Federation:

Periods 1 – 1961–1990; 2 – 1991–2000; 3 – 1990–1999, model INMCM4; 4 – 2001–2010; 5 – 2046–2055, model INMCM4, scenario RCP4,5; 6 – 2046–2055, model INMCM4, scenario RCP8,5; 7 – 2046–2055, model MPI-ESM-LR, scenario RCP4,5; 8 – 2046–2055, model MPI-ESM-LR, scenario RCP8,5; 9 – 2046–2055, model HadGEM2-ES, scenario RCP4,5; 10 – 2046–2055, model HadGEM2-ES, scenario RCP8,5

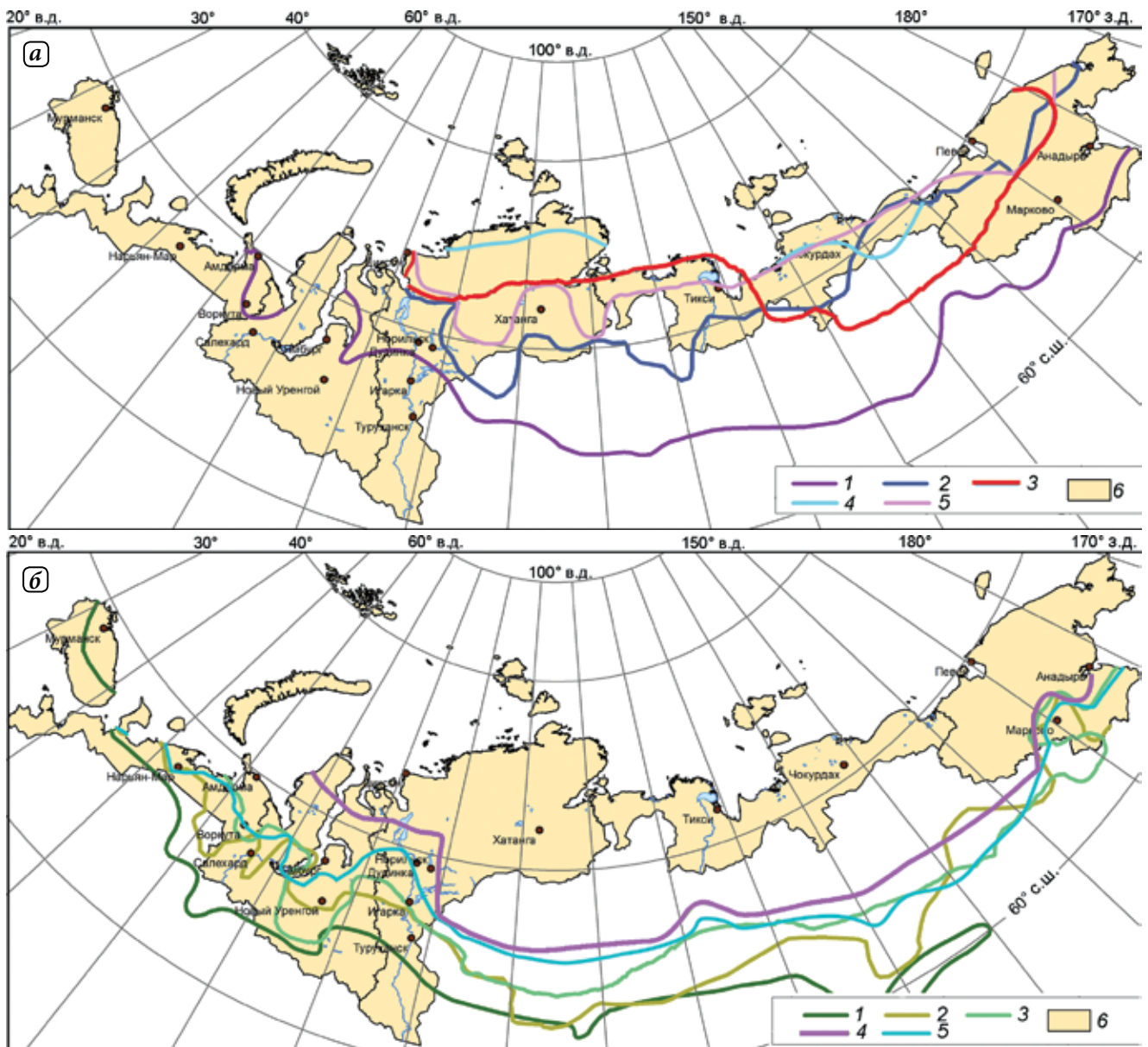
приятных территорий по сравнению с периодом 1961–1990 гг. В то же время наблюдалось увеличение в 1,4 раза площади территорий с очень неблагоприятными условиями (более мягкая градация дискомфорта) и в 1,8 раза площади с неблагоприятными условиями (более мягкая градация дискомфорта). Площади территорий с неблагоприятными условиями при современном потеплении достигают 17% территории АЗРФ по сравнению с 7% в 1961–1990 гг. В результате ослабления климатического дискомфорта в АЗРФ расширилась площадь условно неблагоприятных территорий – до 8%. При потеплении климата в Арктической зоне площадь территорий с абсолютно неблагоприятными условиями сократилась на 857 тыс. км<sup>2</sup>, или на 24%. При этом площадь как очень неблагоприятных, так и неблагоприятных территорий увеличилась на 10%, а условно неблагоприятных – на 4% (см. табл. 2).

Отметим, что потепление климата в Арктической зоне Российской Федерации в конце XX – начале XXI в. было неоднородно не только в пространстве, но и во времени. Скорость сокращения абсолютно неблагоприятных территорий

увеличивалась. Так, в конце XX в. она составляла 33,5 тыс. км<sup>2</sup>/год, а в XXI в. – уже 85,7 тыс. км<sup>2</sup>/год (если предположить равномерность изменений). Расширение территорий с более мягкими градациями дискомфорта также выросло с 25,5 тыс. км<sup>2</sup>/год в конце XX в. до 37,4 тыс. км<sup>2</sup>/год в начале XXI в. для очень неблагоприятных территорий и с 6,9 тыс. км<sup>2</sup>/год до 34,4 тыс. км<sup>2</sup>/год в этот же период – для неблагоприятных (т.е. почти в пять раз).

Площади зон дискомфорта при современном климате и модельном (2046–2055 гг.) потеплении в АЗРФ представлены на рис. 2. По данным моделей, ожидаемое потепление в 2046–2055 гг. («мягкий» антропогенный сценарий RCP4,5) будет сравнимо по влиянию на балльные оценки дискомфорта жизнедеятельности населения с потеплением для периода 2001–2010 гг. Более «жёсткий» сценарий RCP 8,5 показывает наибольшее сокращение площади абсолютно неблагоприятных территорий за счёт расширения очень неблагоприятных и неблагоприятных (более мягкие градации дискомфорта) территорий (см. табл. 2 и рис. 2). Таким образом, модельное потепление может привести к значимому сокращению площа-





**Рис. 3.** Южная граница абсолютно неблагоприятной (а) и очень неблагоприятной (б) зоны на карте «Районирование территории Российской Федерации по природным условиям жизни населения»: 1 – период 1961–1990 гг.; 2 – период 2001–2010 гг.; 3 – период 2046–2055 гг., модель INMCM4, сценарий RCP8,5; 4 – период 2046–2055 гг., модель HadGEM2-ES, сценарий RCP8,5; 5 – период 2046–2055 гг., модель MPI-ESM-LR, сценария RCP8,5; 6 – территория Арктической зоны Российской Федерации

**Fig. 3.** South boundary of an absolutely unfavorable zone on the map «Zoning of the Russian territory according to living conditions of the population»: 1 – period 1961–1990; 2 – period 2001–2010; 3 – period 2046–2055, model INMCM4, scenario RCP8,5; 4 – period 2046–2055, model HadGEM2-ES, scenario RCP8,5; 5 – period 2046–2055, model MPI-ESM-LR, scenario RCP8,5; 6 – The Arctic zone of the Russian Federation

дей с наиболее дискомфортными условиями и заменой их менее дискомфортными.

Основные отличия связаны с локализацией будущих изменений. В отличие от современного потепления, в середине XXI в. можно ожидать со-

кращения площади абсолютно неблагоприятных территорий на севере Красноярского края и небольшого расширения этих территорий (по сравнению с современным климатом) на севере Якутии и Чукотского автономного округа (рис. 3).

В середине XXI в. в АЗРФ площадь территорий с абсолютно неблагоприятными условиями, вероятно, уменьшится с 21% (модель INMCM4) до 57% (модель HadGEM2-ES) по сравнению с периодом 1961–1990 гг. При этом увеличатся площади очень неблагоприятных, неблагоприятных и условно неблагоприятных территорий на 10–23, 7–15 и 4–17% по соответствующим моделям (см. табл. 2). При сравнении площадей в периоды 2001–2010 и 2045–2055 гг. видно, что при ожидаемом потеплении площади территорий с абсолютно неблагоприятными условиями могут увеличиться всего на 3% для модели INMCM4 и уменьшиться на 11 и 33% для моделей MPI-ESM-LR и HadGEM2-ES соответственно. При этом площадь неблагоприятных территорий может сократиться на 3–7% по моделям INMCM4 и MPI-ESM-LR и увеличиться на 5% по модели HadGEM2-ES (см. табл. 2). Таким образом, при «мягком» сценарии потепления изменения площадей с разной степенью дискомфорта в Арктической зоне по сравнению с современными условиями ожидаются не очень большими по моделям INMCM4 и MPI-ESM-LR и значительными – по модели HadGEM2-ES.

При более «жестком» сценарии RCP 8,5 изменения площадей неблагоприятных территорий больше. Так, площади абсолютно неблагоприятных территорий при реализации этого сценария могут сократиться на 35–60% по сравнению с периодом 1961–1990 гг. и на 11–36% по сравнению с периодом 2001–2010 гг. При этом ожидается расширение очень неблагоприятных (более мягкая градация дискомфорта) территорий на 18–22 и 8–12%, неблагоприятных – на 12–10 и 2–0% и относительно неблагоприятных – на 5–24 и 1–21% соответственно для тех же периодов и моделей (см. табл. 2).

В середине XXI в. скорости изменения площадей территорий с различным уровнем дискомфорта в Арктической зоне замедляются по сравнению с концом XX в. Скорость сокращения абсолютно неблагоприятных территорий для сценария RCP8,5 вероятно, уменьшится до 9,5 тыс. км<sup>2</sup>/год (при равномерности изменений) по модели INMCM4, до 21,6 и 31,9 тыс. км<sup>2</sup>/год по моделям MPI-ESM-LR и HadGEM2-ES соответственно. Для сценария RCP4,5 площадь абсолютно неблагоприятных территорий стала немного увеличиваться со скоростью 2,6 тыс. км<sup>2</sup>/год для модели INMCM4, но для моделей MPI-ESM-LR и MPI-ESM-LR площадь этой зоны будет умень-

шаться со скоростью 9,1 и 29,2 тыс. км<sup>2</sup>/год. Расширение территорий с более мягкими грациями дискомфорта – очень неблагоприятных и неблагоприятных – также замедлилось: для сценария RCP8,5 – до 6,7 тыс. км<sup>2</sup>/год; для модели INMCM4 – до 2,1 тыс. км<sup>2</sup>/год; для модели MPI-ESM-LR – до 15,6 и 0,3 тыс. км<sup>2</sup>/год и для модели HadGEM2-ES до 10,6 и 0 тыс. км<sup>2</sup>/год соответственно.

На рис. 3 показано смещение южных границ абсолютно неблагоприятной и очень неблагоприятной зон в Арктической зоне и на прилегающих территориях для рассматриваемых периодов и моделей по сценарию RCP8,5. Как видно из рис. 3, а, южная граница абсолютно неблагоприятной зоны оказалась очень чувствительной к потеплению и её смещение было максимальным. Ослабление дискомфорта до очень неблагоприятной градации и отступление южной границы абсолютно неблагоприятной зоны происходили в западном секторе Арктической зоны почти до п-ова Таймыр для всех моделей. Население этого сектора составляет около 1,4 млн человек (или 88% общей численности населения Арктической зоны). Смещение границы имело меридиональный характер, что может быть объяснено влиянием Атлантики. Восточнее р. Енисей ослабление дискомфорта было преимущественно зональным. Наибольшее ослабление дискомфорта и максимальное смещение границы показывает модель HadGEM2-ES, согласно которой абсолютно неблагоприятная зона практически исчезает на материковой части Арктической зоны.

Граница очень неблагоприятной зоны оказалась менее чувствительной к потеплению ввиду его меньшей интенсивности в этих широтах. При этом основные изменения также наблюдались на севере Европейской части России и на севере Западной Сибири, где южная граница очень неблагоприятной зоны отступила в северо-восточном направлении для всех моделей. В Мурманской области очень неблагоприятная зона в начале XXI в. вообще исчезла (см. рис. 3, б). На юге Чукотского АО граница очень неблагоприятной зоны в начале текущего столетия также сместилась к северу. Но повсеместно смещение границы было менее значительным. Максимальные изменения показывает также модель HadGEM2-ES, особенно в западной части Арктической зоны.

Таким образом, в результате потепления 1991–2010 гг. в Арктической зоне произошло значительное сокращение территории с абсолютно неблагоприятными условиями с переходом этих территорий в градацию очень неблагоприятных. Масштаб сокращения сравним с изменением дискомфорта при «мягком» антропогенном сценарии для периода 2046–2055 гг. для моделей INMCM4 и MPI-ESM-LR. Максимальные изменения в Арктической зоне для середины XXI в. ожидаются по модели HadGEM2-ES.

### Заключение

Современное потепление климата в период 1991–2010 гг. привело к значительному ослаблению климатического дискомфорта в Арктической зоне Российской Федерации. Оно выразилось в сокращении площадей с абсолютно неблагоприятными условиями для жизнедеятельности населения и формированием на их месте условий с более слабой дискомфортоностью. Абсолютно неблагоприятные условия для жизнедеятельности населения сохранились только в наименее заселённой центральной и отчасти восточной частях Арктической зоны. Изменение климата связано с уменьшением суммы отрицательных температур

и числа дней с очень низкими температурами, а также с ростом суммы активных температур и увеличением безморозного периода. Районы Арктической зоны Российской Федерации, где наблюдалось наибольшее ослабление климатического дискомфорта, представляют собой муниципальные образования, выходящие к Баренцеву морю и западной части Карского моря с населением около 1,4 млн человек, а также к Тихому океану (южная часть Чукотского автономного округа).

Последствия потепления в Арктической зоне Российской Федерации в период 1991–2010 гг. оказались сопоставимы с ожидаемыми изменениями, полученными по результатам численных экспериментов на модели Института вычислительной математики РАН (INMCM4) и модели Метеорологического института им. Макса Планка MPI-ESM-LR для «мягкого» сценария RCP4,5. Максимальные изменения в Арктической зоне для середины XXI в. возможны по модели Метеорологического офиса Хэдли Центра HadGEM2-ES.

**Благодарности.** Исследование выполнено в Институте географии РАН с помощью гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-10236).

**Acknowledgement.** Researches were supported by Russian Science Foundation (RSF) grant No. 16-17-10236.

### Литература

1. Электронный ресурс <http://www.government.ru/docs/22846/>
2. НИР: Разработка предложений по определению южной границы Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Основные положения и выводы 1 этапа работы (2009). Шифр темы 2002-07-09. Заказчик Минэкономразвития России, ИГРАН, 2009.
3. Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Виноградова В.В. Районирование России по природным условиям жизни населения. М.: ГЕОС, 2012. 156 с.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
5. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Евразийская Арктика. Климатически обусловленные колебания ледников во второй половине XX в. // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 2006. С. 97–114.
6. Туткова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в нача-

### References

1. <http://www.government.ru/docs/22846/>
2. *Razrabotka predlozheniy po opredeleniyu yuzhnoy granitsy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii (AZRF)*. Research: Development of proposals on definition of the southern border of the Arctic zone of the Russian Federation. The main provisions and conclusions of phase 1 work (2009). Cipher themes 2002-07-09. Customer: Ministry Of Economic Development, IGRAS, 2009. [In Russian].
3. *Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Vinogradova V.V. Rayonirovanie Rossii po prirodnyim usloviyam zhizni naseleniya*. Zoning of Russia by natural conditions of life. Moscow: Geos, 2012: 156 p. [In Russian].
4. *Vtoroy otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. The second estimation report on climate changes and their consequences on the territory of Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2014: 1009 p. [In Russian].
5. *Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya.* Eurasian Arctic. Climate-driven fluctuations of glaciers in the second half of the twentieth century. *Olednenie Severnoy I Tsentral'noy*

- ле XXI в. по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33.
7. Дроздов Д.С., Слагода Е.А., Абрамов А.А., Ермак А.А., Орехов П.Т. Предварительные результаты геокриологических исследований на острове Хейса (Земля Франца-Иосифа): Материалы 4-й конф. геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 7–9 июня 2011 г. Региональная и историческая геокриология. Т. 2. Ч. 5. М.: Университетская книга, 2011. С. 52–59.
  8. Малкова Г.В. Мониторинг температуры и глубины сезонного протаивания пород на стационаре Болванский в дельте Печоры: Материалы 4-й конф. геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 7–9 июня 2011 г. Региональная и историческая геокриология. Т. 2. Ч. 5. М.: Университетская книга, 2011. С. 111–118.
  9. Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 4. С. 74–94.
  10. Электронный ресурс. Федеральная служба государственной статистики <http://www.gks.ru>
  11. Виноградова В.В., Золотокрылин А.Н. Современные и ожидаемые изменения роли климатического фактора в оценке природных условий жизни населения в Российской Федерации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 4. С. 16–21.
  12. Электронный ресурс. Архив ВНИИГМИ-МЦД <http://www.meteo.ru>
  13. Volodin E.M. Possible reasons for low climate-model sensitivity to increased carbon dioxide concentrations // Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. V. 50. № 4. P. 350–355.
  14. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the inmcm 4,0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations // Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. V. 46. № 4. P. 414–431.
  15. Электронный ресурс <ftp://ftp.ceda.ac.uk/badc/cmip5/data/cmip5/output1/>
  16. Брызгин Н.Н., Дементьев А.А. Опасные метеорологические явления в Российской Арктике. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 156 с.
  17. Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю., Виноградова В.В. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зимний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 117–125.
  - Evrazii v sovremennuyu epokhu. Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka, 2006: 97–114. [In Russian].*
  6. Titkova T.B., Vinogradova V.V. Snow occurrence time on the Russia's territory in the early 21st century (from satellite data). *Led i Sneg. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 25–33. [In Russian].*
  7. Drozdov D.S., Slagoda E.A., Abramov A.A., Ermak A.A., Orekhov P.T. Preliminary results of geocryological studies on the island of Heiss (Franz Josef Land). *Materialy 4 konferentsii geokriologov Rossii. Materials of the fourth conf. of geocryologists of Russia. Moscow: Universitetskaya kniga. 2011, 2 (5): 52–59.*
  8. Malkova G.V. Monitoring of temperature and depth of seasonal thawing of rocks at Bolvansky station in the Pechora Delta. *Materialy 4 konferentsii geokriologov Rossii. Materials of the fourth conf. of geocryologists of Russia. Moscow: Universitetskaya kniga. 2011, 2 (5): 111–118.*
  9. Grigoriev M.N., Razumov S.O., Kunitskiy V.V., Spektor V.B. Dynamics of the shores of the eastern Arctic seas of Russia: main factors, patterns and trends. *Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth. 2006, X (4): 74–94.*
  10. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Federal state statistics service. <http://www.gks.ru>*
  11. Vinogradova V.V., Zolotokrylin A.N. Current and future role of climatic factor in the estimation of natural conditions of life in Russia. *Izvestiya Rossiiskoy Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series. 2014, 4: 16–21. [In Russian].*
  12. *Arkhiy VNIIGMI-MTSD. Archive RIHMI WDC. <http://www.meteo.ru>*
  13. Volodin E.M. Possible reasons for low climate-model sensitivity to increased carbon dioxide concentrations. *Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014, 50 (4): 350–355.*
  14. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the inmcm4,0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010, 46 (4): 414–431.*
  15. <ftp://ftp.ceda.ac.uk/badc/cmip5/data/cmip5/output1/>
  16. Bryazgin N.N., Dement'ev A.A. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya v Rossiiskoy Arktike. Dangerous meteorological phenomena in the Russian Arctic. Saint Petersburg: Roshydromet, 1996: 156 p. [In Russian].*
  17. Titkova T.B., Mikhailov A.Y., Vinogradova V.V. Arctic front and Barents Sea ice coverage in winter. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2014, 11 (3): 117–125. [In Russian].*