

## РЕГИОНАЛЬНАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЛЕТНЕГО ПОТЕПЛЕНИЯ МАТЕРИКОВОЙ АРКТИКИ КАК ИНДИКАТОР ПРИРОДНЫХ ГРАНИЦ СЕВЕРНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Т. Б. Титкова, А. Н. Золотокрылин  
Институт географии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 января 2021 г.

Выявлены особенности летнего потепления различных секторов Арктической зоны России в современный период и в ближайшем будущем. Представлен уникальный анализ междекадного распространения трендов характеристик поверхности природных зон (вегетационного индекса, суммарной эвапотранспирации, температуры поверхности, альбедо) в связи с рассмотренной особенностью летнего потепления 1991–2018 гг. Изменение климатических условий дает предпосылки к изменению спектральных характеристик ландшафтных зон, особенно в центральном секторе российской Арктической зоны. Анализ потепления основан на оценке температурных трендов и широтного смещения изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  в летние месяцы. Согласно физико-географическому подходу, южная граница тундры проходит примерно по изотерме июля  $+10^{\circ}\text{C}$ . В условиях потепления такой индикатор является ключевым для определения изменения теплообеспеченности и развития вегетации в северных ландшафтных зонах. В 1991–2018 гг. в российской Арктической зоне продвижение изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  к северу увеличивается от десятилетия к десятилетию. Наибольшие сдвиги заметны в июне в западном и центральном секторах российской Арктики, что приводит к росту температуры поверхности и увеличению зоны активной вегетации растений. В результате положительные тренды NDVI и эвапотранспирации и отрицательные альбедо достигают максимальных значений в лесотундре Западной Сибири и тундре Таймыра. При этом в июле смещение изотермы  $+10^{\circ}$  минимально на большей части территории, что отразилось в минимуме изменений спектральных характеристик поверхности. Август отмечен значительными колебаниями положения изотермы между декадами. Модельные прогнозы предполагают, что в следующем десятилетии (2031–2040 гг.) на фоне продолжающегося потепления колебание положения изотермы в июле ожидается в пределах стандартного отклонения конца XX в. (1991–2000 гг.). В июне и августе возможно более ощутимое смещение к северу изотермы в западном секторе Арктической зоны, что предполагает дальнейшее увеличение здесь зоны активной вегетации и изменение спектральных характеристик поверхности.

**Ключевые слова:** Арктическая зона России, динамика потепления, температурные тренды, изотерма  $+10^{\circ}\text{C}$ , ландшафтные зоны, активная вегетация, вегетационный индекс NDVI, суммарная эвапотранспирация  $E_v$ , температура поверхности  $T_s$ , альбедо  $Al$ , антропогенное потепление, SMIP5.

### Введение

Температура воздуха является индикатором как регионального, так и глобального изменения климата. Среднегодовая температура воздуха в Арктической зоне России продолжает увеличиваться и почти вдвое превышает скорость роста средней глобальной температуры. Наблюдения показывают, что 2019 г. в Арктической зоне стал вторым самым теплым с 1900 г. [1].

Существует целый ряд работ [2–7], в которых с той или иной степенью подробности рассматрива-

ются различные аспекты потепления Арктической зоны России и их причины. В основном результаты исследований сводятся к тому, что потепление в Арктике, особенно в ее европейском секторе, вызвано совокупностью региональных факторов, которые действуют однонаправленно в сторону усиления процесса потепления.

Основные факторы, которые могут влиять на потепление, связаны с океаническими и атмосферными процессами. Океанический фактор обусловлен атлантической мультидекадной осцилляцией (AMO) — долгопериодным изменением температу-

ры поверхности в северной части Атлантического океана (0—70° с. ш.), которое характеризуется чередованием холодных и теплых фаз. Главным механизмом влияния АМО на климатический режим является атмосферная реакция на термические аномалии в океане, приводящая к смещению центров действия атмосферы, изменению интенсивности и преобладающего направления распространения атмосферных циклонов и антициклонов [5; 6]. Атмосферный фактор — Северо-Атлантическое колебание (САК), определяемое как разность атмосферного давления между азорским максимумом и исландским минимумом. При отрицательной фазе САК создаются благоприятные условия для формирования положительной аномалии температуры поверхности океана вследствие преобладающих ветров юго-западных направлений над областью Северо-Атлантического течения [2], что приводит к усилению притока теплой воды в Северо-Европейский бассейн и в Баренцево море. Изменчивость потепления в Американском регионе Арктики, включая прилегающую часть восточного сектора российской Арктики, определяется преимущественно тихоокеанскими факторами [8]: тихоокеанским/североамериканским индексом (Pacific/North American Pattern, PNA), тихоокеанским декадным колебанием (Pacific Decadal Oscillation, PDO), северотихоокеанским колебанием (North Pacific Oscillation, NPO).

Одним из предлагаемых механизмов арктического усиления является снижение летнего альбедо из-за потери морского льда и снежного покрова [9] и, как следствие, увеличение количества водяного пара и облаков в арктической атмосфере [10; 11]. При этом потепление в Арктике крайне неравномерно как во времени, так и в пространстве.

Положение изотермы наиболее теплого месяца +10°C принимается в качестве одного из критериев южной границы Арктической зоны. Она ограничивает территорию, где возможна активная вегетация растений. Положение изотермы +10°C и ее отклонение могут наглядно иллюстрировать интенсивность температурных трендов. Также положение изотермы +10°C определяет условия вегетационного периода и сумму активных температур, характеризующие количество тепла, необходимого для развития растений в вегетационный период [12]. В условиях потепления климата это ключевой индикатор для определения изменения теплообеспеченности и развития вегетации.

Согласно физико-географическому подходу, южная граница тундры проходит примерно по изотерме июля +10°, а положение северной границы леса совпадает с июльской изотермой +11°C [13, с. 42]. Повышение температуры воздуха создает предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах, в частности увеличения растительности, расширения кустарников [14; 15]. Такое развитие событий подтверждает наметившиеся в начале XXI в. изменения в зоне тундр и лесотундр, которые произошли главным образом за счет увеличения теплообеспеченности и более раннего начала вегетации, осо-

бенно на европейской части страны и в Западной Сибири [16—18].

Арктическая зона — территория с достаточным и избыточным увлажнением (коэффициент увлажнения преимущественно больше единицы) [17]. Осадки являются изменчивым параметром и при избыточном увлажнении в меньшей степени оказывают влияние на ландшафты Арктической зоны, чем теплообеспеченность. Отклик растений на изменения внешних условий в зоне активной вегетации, которая определяется изотермой +10°C, проявляется в первую очередь в изменении интенсивности протекания их основных физиологических процессов, прежде всего углеродного и водного обмена [19; 20].

Данная работа посвящена исследованию региональной изменчивости положения изотермы +10°C как индикатора природных границ северных ландшафтов. Она направлена на изучение трендов характеристик поверхности природных зон (вегетационный индекс, альбедо, температура поверхности, суммарная эвапотранспирация), отражающих в арктической среде последствия климатических изменений для спектральных характеристик ландшафтов.

#### Материалы и методы

Исследования проводились в материковой части российской Арктики севернее 65° с. ш., включающей субарктические (тундровые и лесотундровые) и бореальные (северотаежные) ландшафты. Привлечение стационарных метеорологических данных позволило провести анализ изменения положения изотермы +10°C в летние месяцы со второй половины XX в. до второго десятилетия XXI в. Использование модельных прогнозов SMIP5 дает возможность проследить развитие потепления материковой Арктики в ближайшем будущем.

Для оценки положения изотермы +10°C в июне, июле и августе использовались данные по 169 метеостанциям на территории России, расположенным севернее 65° с. ш., из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (<http://meteo.ru/>) за 1961—2018 гг. Анализировались два климатических периода: 1961—1990 гг. как базовый и 1991—2018 гг. как период современного потепления. Дополнительно оценивалась декадная динамика потепления в 1991—2018 гг. Анализировалось положение изотермы +10°C в летние месяцы, ее стандартное отклонение, широтное смещение на фоне потепления в разных секторах Арктики с точностью до 0,5° широты. Значимость линейных трендов температуры оценивалась с вероятностью 0,95 по критерию Стьюдента.

Использованы данные модельных проекций будущего климата по глобальным моделям CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, <ftp://ftp.ceda.ac.uk/badc/cmip5/data/cmip5/output1/>). Сегодня во всем мире количество известных глобальных моделей составляет несколько десятков, и среди них

выбранные модели лучше прочих описывают современный климат. Для середины XXI в. все сценарии дают весьма близкие оценки накопления парниковых газов. В данном случае выбор сценария RCP4.5 связан с его частым использованием выбранными нами моделями. Ансамблевые оценки ожидаемого смещения изолинии  $+10^{\circ}\text{C}$  к 2031—2040 гг. по сравнению с базовым периодом 1991—2000 гг. получены при осреднении данных по температуре воздуха летних месяцев, рассчитанном по данным трех наиболее часто используемых моделей HadGEM2-ES ( $2,5\times 2,5^{\circ}$ ), MPI-ESM-LR ( $2\times 2^{\circ}$ ), INMCM4 ( $1,5\times 2^{\circ}$ ). Был использован сценарий RCP4.5 как наиболее реалистичный, при котором предполагаемое радиационное воздействие, создаваемое парниковыми газами, достигнет к 2100 г.  $4,5 \text{ Вт/м}^2$ , а средняя температура увеличится к середине XXI в. на  $1,4^{\circ}\text{C}$  по сравнению с концом XX в.

Для изучения отклика экосистем северных ландшафтов на климатические флуктуации использовались спектральные характеристики подстилающей поверхности с определением их трендов в XXI в.: альbedo  $A_l$ , температура поверхности  $T_s$ , нормализованный вегетационный индекс NDVI и суммарная эвапотранспирация  $E_v$ .

Значения альbedo поверхности рассчитаны по модели MCD43C1v006 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v006/>) с использованием 16-дневных данных Terra и Aqua MODIS для середины июля (с 7 по 25 июля) с разрешением  $0,05\times 0,05^{\circ}$ . В этой модели альbedo рассчитывается как функция двунаправленного отражения поверхности.

Среднемесячная температура поверхности рассчитывалась по модели MOD11C3 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>). В ней используются осредненные ежедневные значения коэффициента излучения поверхности Земли с разрешением  $0,05\times 0,05^{\circ}$ .

Для определения реакции растительного покрова на температурные аномалии использовался нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) за 2000—2020 гг. Анализ проводился по данным NDVI в июле, полученным с помощью модели MOD13C2, версия 6, для среднемесячных значений с разрешением  $0,05\times 0,05^{\circ}$  (MODIS, mod13c2v006, 2019). Глобальные данные представляют собой безоблачные пространственные композиты поверхности за этот месяц (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>).

Месячная суммарная эвапотранспирация оценивалась по модели NLDAS-2 с разрешением  $0,1\times 0,1^{\circ}$ . Эта модель является продуктом MERRA-2. Данные доступны с 1982 г. по настоящее время. Modern-Era версии 2 (MERRA-2) — атмосферный реанализ NASA для спутниковой эры с использованием модели системы наблюдения Goddard Earth, версия 5 (GEOS-5), с системой ассимиляции атмосферных данных (ADAS), версия 5.12.4 ([https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/FLDAS/FLDAS\\_NOAH01\\_C\\_GL\\_M.001](https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/FLDAS/FLDAS_NOAH01_C_GL_M.001)).

## Результаты

### *Изменение положения изотермы $+10^{\circ}\text{C}$ в климатические периоды*

Характерная особенность летнего потепления в Арктической зоне России в последний климатический период 1991—2020 гг. состоит в том, что максимальное потепление наблюдалось в начале лета. Оно было региональным и затронуло в основном высокие широты Западной и Средней Сибири, но не охватило все сектора Арктической зоны.

Наблюдаемые процессы вызваны глобальными циркуляционными причинами потепления в Арктике. Анализ фаз циркуляционных индексов в летние месяцы свидетельствует о положительной фазе АМО, отрицательной САК и отрицательной АК (Арктического колебания) в период потепления 2001—2018 гг., что вызвало адвекцию теплой воды на север в системе теплого Северо-Атлантического течения. Эти процессы отразились на колебании температуры воздуха в высоких широтах России (севернее  $64$ -й параллели) в разные циркуляционные эпохи. По типизации Б. Л. Дзердзеевского (1956) в эпоху 1981—1997 гг. увеличивалась продолжительность долгой южной циркуляции, а эпоха 1998—2015 гг. характеризуется увеличением продолжительности уже долгой северной циркуляции. Потепление в северных районах Западной Сибири летом связано с совместным воздействием высокой повторяемости выходов южных циклонов и высокой повторяемости меридиональной северной циркуляции. Этот процесс вызывает летом повышение температуры за счет быстрого прогрева над континентом сухого воздуха в арктических антициклонах [21]. Такие выводы подтверждаются работой [22], где отмечается, что к концу XX столетия (в 1990-е годы) особенно заметно увеличилось количество циклонов, приходивших на территорию Западной Сибири с южных направлений, и антициклонов с северных направлений. Обнаруженные тенденции свидетельствуют об усилении меридиональности в циркуляции атмосферы над Западной Сибирью. При меридиональном типе циркуляции междуширотный перенос тепла значительно больше, чем при зональном, следовательно, рост повторяемости аномалий температуры воздуха и осадков вполне объясним.

Такие циркуляционные условия нашли отражение в поведении изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  и, как следствие, в изменении ландшафтных характеристик Арктической зоны России. Июньское потепление в Западной и Средней Сибири было самым сильным (до  $+2^{\circ}\text{C}/10$  лет) (рис. 1а) и вызвало заметный сдвиг изолинии  $+10^{\circ}\text{C}$  к северу в пределах  $2$ — $3,5^{\circ}$  широты. В этом районе среднее июньское положение изолинии  $+10^{\circ}\text{C}$  сместилось к северной границе стандартного отклонения периода 1961—1990 гг. В этот период ее положение определялось границами северотаежной зоны. В последующий период среднее июньское положение изолинии  $+10^{\circ}\text{C}$  приблизилось к южной границе лесотундры.

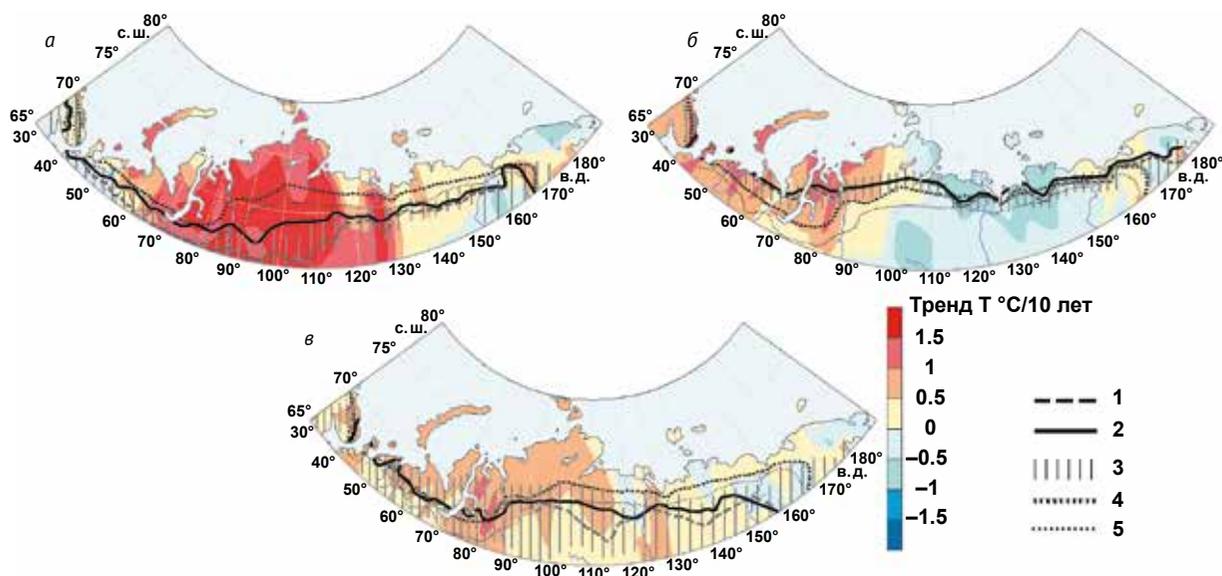


Рис. 1. Тренд температуры 1991–2018 гг. и положение изотермы +10°C в 1961–1990 гг. (1), 1991–2018 гг. (2) и стандартное отклонение положения изотермы +10°C за 1961–1990 гг. (3): а – июнь, б – июль, в – август. 4 – южная граница тундры, 5 – южная граница лесотундры  
 Fig. 1. Temperature trend in 1991–2018 and the position of the isotherm +10°C in 1961–1990 (1), 1991–2018 (2) and the standard deviation of the position of the isotherm +10°C for 1961–1990 (3): а – June, б – July, в – August. 4 – southern border of the tundra, 5 – southern border of the forest tundra

Июльское потепление было слабее, с положительными трендами июльской температуры до +1,5°C (рис. 1б). При этом положение июльской изотермы в 1991–2018 гг. идентично положению изотермы в 1961–1990 гг., и она, несмотря на потепление в последние декады, оставалась в пределах границ тундровой зоны.

Тренды августовской температуры были разнонаправленными и менялись в пределах –0,5...+1°C (рис. 1в). Изменения положения изотермы лежат в диапазоне изменчивости базового климатического периода. Смещение изотермы +10°C относительно границ ландшафтных зон не наблюдается, и в западном секторе российской Арктике оно соответствует северной границе лесотундры, а восточнее — северной границе северотаежной зоны.

*Динамика декадного потепления в 1991–2018 гг. и реакция подстилающей поверхности северных ландшафтов*

Представляет интерес анализ междекадного поведения изотермы +10°C в 1991–2018 гг. и реакция подстилающей поверхности на эти изменения на примере области с максимальным потеплением (восточная часть Западной Сибири и Таймыр). Смещение изотермы +10°C к северу может предопределять сложную и неоднозначную реакцию спектральных характеристик поверхности экосистем. Одни и те же тенденции климата отзываются по-разному на элементах ландшафтов. Реакция может различаться как в качественном, так и в количественном отношении. Например, увеличение биомассы (NDVI) в результате увеличения температуры воздуха при достаточном увлажнении

привносит неопределенность в изменения альбедо Al и температуры поверхности Ts [17]. На изменение Al и Ts могут влиять сомкнутость крон и густота растительности, мозаичное изменение преобладающих видов, рельеф и т. д. [23].

В июне изотерма +10° проходит в зоне лесотундры (западный сектор российской Арктики), спускаясь в северотаежную зону восточнее 80° в. д. В первую декаду 1991–2000 гг. наблюдался значимый сдвиг июньской изотермы на север в лесотундровые и тундровые ландшафты соответственно с выходом за диапазон стандартного отклонения базового климатического периода 1961–1990 гг. на территории Западной и Средней Сибири. Этот значимый сдвиг продолжился во вторую декаду (2001–2010 гг.), но уже на территории Европейского Севера. Максимальное смещение изолинии +10°C к северу до 5,5° широты (центральный сектор российской Арктики) в последний период 2011–2018 гг. привело к «прыжку» изолинии из средней части северной тайги на юг тундры.

Продвижение к северу июньской изотермы +10°C наиболее ярко отразилось на изменении спектральных параметров зоны лесотундры Западной и Средней Сибири и тундры Таймыра. В июне 2000–2020 гг. в тундре Таймыра наблюдались максимальные положительные тренды Ts, NDVI, Ev и падение Al, что свидетельствует о значительном повышении здесь вегетационной активности (рис. 2а–2г). Изменения затронули практически всю площадь тундры Таймыра. В лесотундре Восточной Сибири реакция подстилающей поверхности уже слабее на отдельных участках. Вегетационный индекс увеличивается в северной тайге Средней Сибири. Здесь рост NDVI

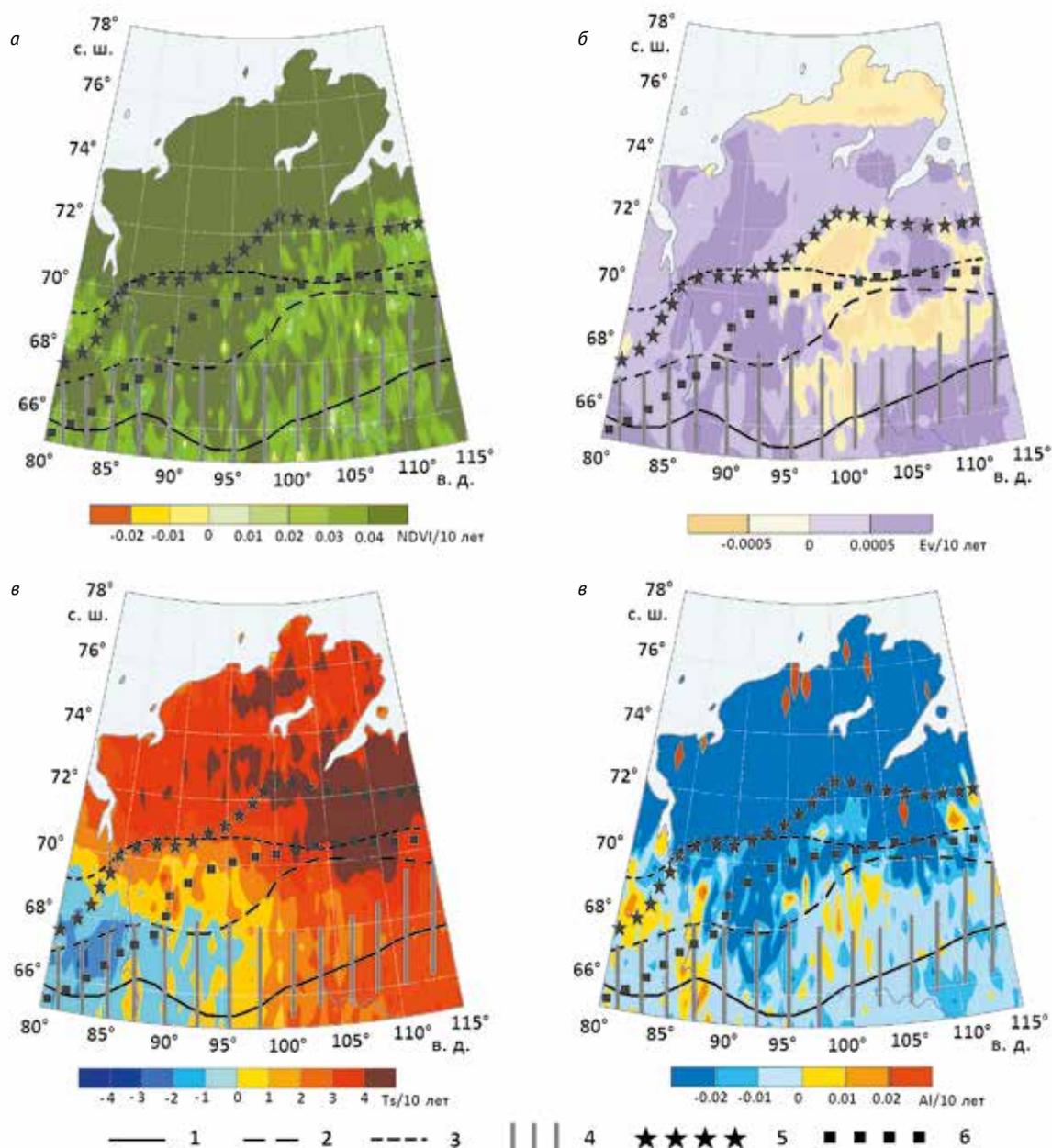


Рис. 2. Тренды характеристик поверхности за 10 лет, июнь 2000–2020 гг.: а – вегетационного индекса NDVI, б – суммарной эвапотранспирации Ev (г/м<sup>2</sup> в с), в – температуры поверхности Ts (°С), г – альbedo Al. Обозначения: 1 – положение изотермы +10°С в 1991–2000 гг., 2 – 2001–2010 гг., 3 – 2011–2020 гг., 4 – стандартное отклонение положения изотермы +10°С за 1961–1990 гг., 5 – южная граница тундры, 6 – южная граница лесотундры

Fig. 2. Trends in surface characteristics over 10 years, June, 2000–2020: а – vegetation index NDVI, б – total evapotranspiration Ev (g/m<sup>2</sup> per sec), в – surface temperature Ts (°C), г – albedo Al. Designations: 1 – position of the isotherm +10°C in 1991–2000, 2 – 2001–2010, 3 – 2011–2020, 4 – standard position deviation of the isotherm +10°C for 1961–1990 гг., 5 – southern border of the tundra, 6 – southern border of the forest tundra

сопровождается как увеличением суммарной эвапотранспирации, так и ее падением на возвышенностях. Температура поверхности уменьшается на западных низменных участках и увеличивается на Среднесибирском плоскогорье. Тренды альbedo более мозаичны, и связь с вегетационной активностью может быть как положительной, так и отрицательной — вне зависимости от рельефа.

В июле изотерма +10°С проходит в основном в зоне тундры. Ее миграция к северу в пределах

зоны тундры началась в 2000-х годах в Западной Сибири и на Таймыре. Но наибольшее смещение изотермы в северном направлении не более 1° широты произошло лишь в период 2011–2018 гг. (рис. 3а–3г). На остальной территории Арктической зоны России колебания изотермы были минимальны и находились в пределах стандартного отклонения 1961–1990 гг.

Такое минимальное смещение изотермы в июле привело к незначительным изменениям спектраль-

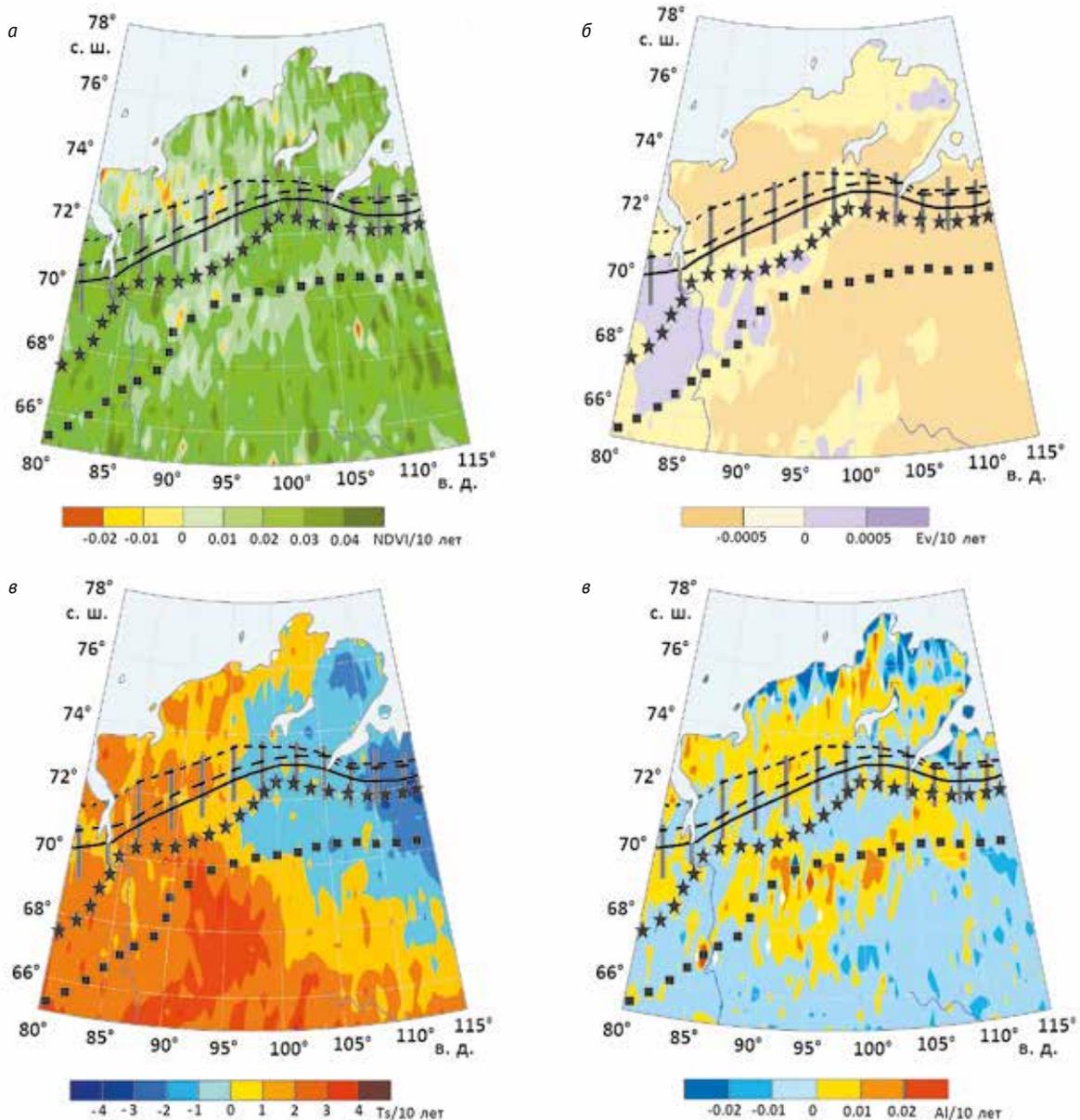


Рис. 3. Тренды характеристик поверхности за 10 лет, июль 2000–2020 гг.: а – вегетационного индекса NDVI, б – суммарной эвапотранспирации  $E_v$  ( $г/м^2$  в с), в – температуры поверхности  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ), г – альbedo  $Al$ . Обозначения см. рис. 2

Fig. 3. Trends in surface characteristics over 10 years, July, 2000–2020: а – vegetation index NDVI, б – total evapotranspiration  $E_v$  ( $g/m^2$  per sec), в – surface temperature  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ), г – albedo  $Al$ . For designations, see Fig. 2

ных характеристик поверхности по сравнению с началом лета. Увеличение вегетационного индекса было минимальным и, вероятнее всего, оно является откликом на июньское потепление. Незначительный рост NDVI сопровождается падением  $E_v$ . В районах максимального увеличения NDVI в июне наблюдается падение  $T_s$ . Тренды альbedo в зоне тундры в основном отрицательны и положительны в северотаежных ландшафтах.

В августе изотерма  $+10^{\circ}C$  проходит в лесотундровой зоне западного сектора российской Арктики ( $30–90^{\circ}$  в. д.) и по северу северотаежной зоны восточного сектора ( $90–190^{\circ}$  в. д.). Август последнего климатического периода примечателен значительным декадным колебанием изотермы  $+10^{\circ}C$  (рис.

4а–4г) как к северу, так и к югу. Потепление в августе было незначительным (менее  $0,5^{\circ}C$ ) и затронуло в основном Европейский Север и Западную Сибирь. Самым теплым на большей части российской Арктики был август 2001–2010 гг.

Отклик подстилающей поверхности в августе не так однозначен, как в июне и июле. Август — месяц окончания вегетационного сезона в северных ландшафтах, поэтому положительные тренды температуры поверхности привели к мозаичности трендов в зонах активной вегетации и отразились в разнонаправленных трендах  $Al$ , NDVI и  $E_v$  (рис. 4а–4г). Свою роль здесь сыграл и рельеф. В тундре и лесотундре Средней Сибири в августе рост NDVI мало заметен и сопровождается отрицательным трендом

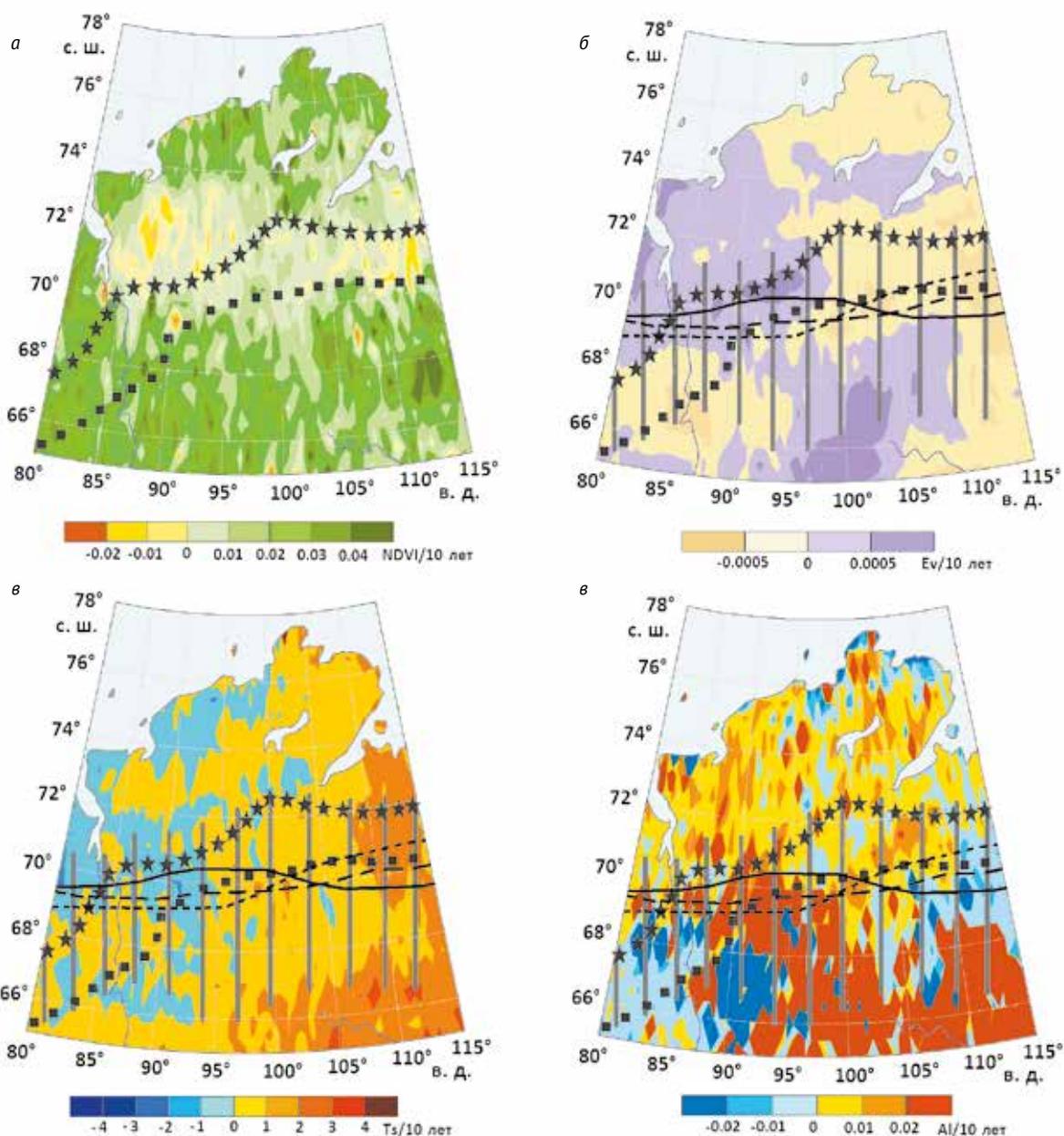


Рис. 4. Тренды характеристик поверхности за 10 лет, август 2000–2020 гг.: а – вегетационного индекса NDVI, б – суммарной эвапотранспирации Ev ( $\text{г}/\text{м}^2$  в с), в – температуры поверхности Ts ( $^{\circ}\text{C}$ ), г – альбедо Al. Обозначения см. рис. 2  
 Fig. 4. Trends in surface characteristics over 10 years, August, 2000–2020: а – vegetation index NDVI, б – total evapotranspiration Ev ( $\text{g}/\text{m}^2$  per sec), в – surface temperature Ts ( $^{\circ}\text{C}$ ), г – albedo Al. For designations, see Fig. 2

Ev, а также падением Al. Изменение Ts минимально. Небольшое повышение NDVI продолжается в северотаежных ландшафтах, где на некоторых участках идет рост Ev, Ts и Al.

*Ожидаемое антропогенное потепление*

На рис. 5 представлены результаты из ансамбля рассматриваемых моделей антропогенного климата. Все модели по-разному демонстрируют сдвиги к северу изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  в июне и августе в западных и центральных секторах российской Арктики, что может привести к дальнейшему расширению территории с активной вегетацией в лесотундровых и тун-

дровых ландшафтах в западном секторе российской Арктики и северотаежных ландшафтах Западной и Средней Сибири. Сдвиги июльской изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  минимальны и колеблются в пределах стандартного отклонения своего нахождения в конце XX в.

По модели HadGEM2-ES значительные сдвиги к северу изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  ожидаются в июне и августе в Западной и Средней Сибири от  $3^{\circ}$  до  $7^{\circ}$  по широте, в Восточной Сибири только в августе до  $3,5\text{--}4^{\circ}$  широты. Модель MPI-ESM-LR показывает сдвиги изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  к северу в июне на всей территории на уровне  $1\text{--}2,5^{\circ}$  широты. Прогноз на август дает смещение к северу изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$

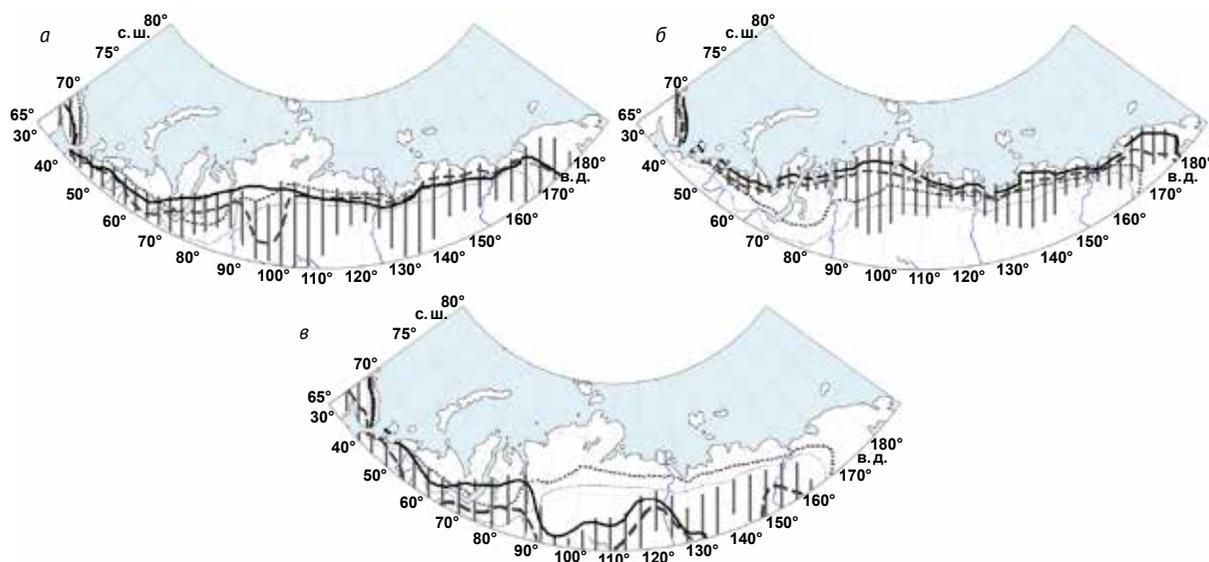


Рис. 5. Широтное смещение изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  в 2031–2040 гг. относительно 1991–2000 гг. по моделям SMIP5 и стандартное отклонение положения изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  за 1991–2000 гг.: а – июнь, б – июль, в – август. Обозначения см. рис. 1

Fig. 5. Evection in latitude of the isotherm  $+10^{\circ}\text{C}$  in the period of 2031–2040 relative to 1991–2000 according to the SMIP5 models and the standard position deviation of the isotherm  $+10^{\circ}\text{C}$  for 1991–2000: а – June, б – July, в – August. For designations, see Fig. 1

в среднем  $2,5\text{—}4^{\circ}$  широты. Прогноз российской модели INMCM4 относительно смещения положения изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  минимален во все месяцы лета.

### Выводы

Характерная особенность летнего потепления в Арктической зоне России в последний климатический период 1991–2018 гг. состоит в том, что максимальное потепление наблюдалось в начале лета. Оно было региональным и затронуло в основном высокие широты Западной и Средней Сибири. Июньское потепление вызвало смещение изолинии  $+10^{\circ}\text{C}$  от границ северотаежной зоны к южной границе лесотундры. Положение июльской изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  соответствует границам тундровой зоны, а в августе — северной границе лесотундры в западном секторе и северной границе северотаежной зоны в центральном и восточном секторах Арктики.

Оценка междекадного поведения июньской изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  в 1991–2018 гг. показала, что продвижение к северу изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  (главным образом в центральном секторе Арктической зоны) отразило положительный тренд температуры воздуха, а также расширило зону активной вегетации растений. Анализ междекадного распространения трендов характеристик поверхности природных зон (альбедо, NDVI, температуры поверхности, суммарной эвапотранспирации) в связи с рассмотренной особенностью летнего потепления 1991–2018 гг. показал, что улучшение вегетационных условий подтверждается положительными трендами вегетационного индекса и суммарной эвапотранспирации в лесотундре Западной Сибири, а также в лесотундре и тундре Таймыра. Здесь редколесья карликовой березы переходят в сомкнутые массивы, кустарники про-

никают в зону лишайниковой тундры, болота зарастают древесно-кустарниковыми породами, моховые тундры замещаются густыми ерниковыми зарослями [23–25]. Таким образом, изменение климатических условий привело к изменению спектральных характеристик ландшафтов, особенно в центральном секторе российской Арктической зоны.

Модельные прогнозы подтверждают наблюдаемые тенденции смещения изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$ . В следующем десятилетии, 2031–2040 гг., на фоне продолжающегося потепления ожидается дальнейшее продвижение изотермы  $+10^{\circ}\text{C}$  в июне и августе на север — в основном в западном и центральном секторах российской Арктики, что может привести к дальнейшему расширению территории с активной вегетацией в лесотундровых и тундровых ландшафтах и к дальнейшему изменению спектральных характеристик северных ландшафтов.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0148-2019-0009 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» и проекта РФФИ № 18-05-60216 «Изменения климата Арктики в XXI веке: механизмы, последствия, неопределенность».

### Литература

1. Arctic Report Cards 2019 / Eds. Richter-Mange J., Druckenmiller M. L., Jeffriess M. — [S. l.], 2019. — 99 p. — URL: <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
2. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // *Фундамент. и прикладная климатология*. — 2017. — № 1. — С. 106–123.

3. Алексеев Г. В., Кузьмина С. И., Бобылев Л. П. и др. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на летнее потепление в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2017. — № 3 (113). — С. 67—77.
4. Клещенко Л. К. О связи среднесезонной температуры воздуха на территории России с колебаниями крупномасштабной циркуляции атмосферы во второй половине XX века // Труды ВНИИГМИ-МЦД. — 2012. — Вып. 176.
5. Полонский А. Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // Мор. гидрофиз. журн. — 2008. — № 4. — С. 69—79.
6. Семенов В. А., Черенкова Е. А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // Докл. РАН. — 2018. — Т. 478, № 6. — С. 697—701. — DOI: 10.7868/S0869565218060178.
7. Шерстюков Б. Г. Анализ изменений климата и их последствий // Труды ВНИИГМИ-МЦД. — 2012. — Вып. 176.
8. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые зап. РГГМУ. — 2018. — № 53. — С. 34—55.
9. Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nat. Geosci. — 2014. — № 7. — P. 181—184. — URL: <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>.
10. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K. Atmospheric moisture transport to the Arctic // J. Climate. — 2016. — № 29. — P. 5061—5081.
11. Kim B.-M., Hong J.-Y., Jun S.-Y. et al. Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016. Critical role of Atlantic windstorm // Sci. Rep. — 2017. — № 7. — P. 40051. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep40051>.
12. Вильфанд Р. М., Страшная А. И., Береза О. В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. — 2016. — Вып. 360. — С. 45—78.
13. Мартынов А. Н., Мельников Е. С., Ковязин В. Ф. и др. Основы лесного хозяйства и таксация леса. — СПб.: Лань, 2008. — 372 с.
14. Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C., Beck P. S. A. et al. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome // Nat. Clim. Change. — 2015. — № 5. — P. 887—891.
15. Salmon V. G., Breen A. L., Kumar J. et al. Alder distribution and expansion across a tundra hillslope: implications for local N cycling // Front. Plant Sci. — 2019. — № 10. — P. 1099. — URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01099>.
16. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12, № 3. — С. 75—86.
17. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 5. — С. 310—323. — DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310.
18. Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia // Polar Science. — 2021. — Febr. 11. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>.
19. Fatichi S., Pappas C., Ivanov V. Modeling plant-water interactions: an ecohydrological overview from the cell to the global scale // WIREs Water. — 2016. — Vol. 3. — P. 327—368. — DOI: 10.1002/wat2.1125.
20. Olchev A. V., Deshcherevskaya O. A., Kurbatova Y. A. et al. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange in the forest ecosystems of southern taiga under climate change // Doklady Biological Sciences. — 2013. — Vol. 450. — P. 173—176. — DOI: 10.1134/S0012496613030216.
21. Кононова Н. К., Самохина О. Ф. Колебания температуры воздуха в высоких широтах России и их связь с циркуляцией атмосферы Северного полушария // Фундам. и прикладная климатология. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 28—56.
22. Тунаев Е. Л., Горбатенко В. П., Поднебесных Н. В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976—2015 гг. // Труды Гидрометеор. науч.-исслед. центра Российской Федерации. — 2017. — № 364. — С. 81—92.
23. Замолодчиков Д. Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда // Успехи соврем. биологии. — 2011. — Т. 131, № 4. — С. 382—392.
24. Русанова Г. В. Почвы реликтовых островков ели на северо-западе Большеземельской тундры // Лесоведение. — 2006. — № 2. — С. 21—25.
25. Kravtsova V. I., Loshkareva A. R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations // Russian J. Ecology. — 2013. — No. 4. — P. 303—311. — DOI: 10.1134/S1067413613040085.

### Информация об авторах

**Титкова Татьяна Борисовна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория климатологии, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: [titkova@igras.ru](mailto:titkova@igras.ru), [ttitkova@yandex.ru](mailto:ttitkova@yandex.ru).

**Золотокрылин Александр Николаевич**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория климатологии, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: [azolotokrylin1938@yandex.ru](mailto:azolotokrylin1938@yandex.ru).

### Библиографическое описание данной статьи

Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики как индикатор природных границ северных ландшафтов // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 386—396. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.

---

## REGIONAL UNEVENNESS OF THE SUMMER WARMING IN THE CONTINENTAL ARCTIC AS AN INDICATOR OF NATURAL BOUNDARIES OF NORTHERN LANDSCAPES

Titkova, T. B., Zolotokrylin, A. N.

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on January 28, 2021

### Abstract

The authors have revealed the features of summer warming in different sectors of the Russian Arctic zone in the modern period and the near future. In connection with the considered features of the summer warming within 1991—2018, the researchers present a unique analysis of the inter-decade distribution of trends in the characteristics of the natural zones surface (vegetation index, total evapotranspiration, surface temperature, albedo). Changes in climatic conditions provide prerequisites for a change in the spectral characteristics of landscape zones, especially in the central sector of the Russian Arctic zone. The warming analysis is based on an assessment of temperature trends and the evection in latitude of the isotherm +10°C in the summer months. According to the physiographic approach, the southern border of the tundra runs approximately along the July isotherm +10°. Under warming conditions, such an indicator is the key one for determining changes in heat supply and vegetation growth in northern landscape zones. During 1991—2018 in the Russian Arctic zone, the isotherm +10°C was moving northwards, increasing from decade to decade. The maximal shift of the isotherm +10°C is noticeable in June in the western and central sectors of the Russian Arctic, resulting in the surface temperature growth and the increase of a zone with active plant vegetation. As a result, positive trends of NDVI and evapotranspiration, as well as negative trends of albedo, reach their maximum values in the forest- tundra of Western Siberia and the tundra of Taimyr. At the same time, in July the shift of the isotherm +10°C is minimal over most of the territory, which is reflected in the minimum changes in the surface spectral characteristics. In August, the isotherm position significantly fluctuates between the decades. Model forecasts assume that in the next decade of 2031—2040 against the background of ongoing warming, fluctuations in the isotherm position in July are expected to be within the standard deviation of the end of the 20th century (1991—2000). In June and August, a more noticeable shift to the north of the isotherm in the western sector of the Arctic zone is possible, which implies a further increase of the active vegetation zone here and a change in the surface spectral characteristics.

**Keywords:** *Russian Arctic zone, dynamics of warming, temperature trends, isotherm +10°C, landscape zones, active vegetation, vegetation index NDVI, total evapotranspiration  $E_v$ , surface temperature  $T_s$ , albedo  $Al$ , anthropogenic warming, SMIP5.*

The work was carried out within the framework of State Assignment No. 0148-2019-0009 “Climate change and its consequences for the environment and livelihoods of the population in Russia” and RFBR Project No. 18-05-60216 “Climate change in the Arctic in the 21st century: mechanisms, consequences, uncertainty”.

### References

1. Arctic Report Cards 2019. Eds. Richter-Mange J., Druckenmiller M. L., Jeffriers M. [S. l.], 2019, 99 p. Available at: <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
2. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I. Influence of low-latitude ocean temperature anomalies on atmospheric heat transfer to the Arctic. *Fundament. i prikladnaya klimatologiya*, 2017, no 1, pp. 106—123. (In Russian).
3. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Bobylev L. P., Urazgildeva A. V., Gnatyuk N. V. Influence of Atmospheric Transport of Heat and Moisture on Summer Warming in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2017, no. 3 (113), pp. 67—77. (In Russian).
4. Kleshchenko L. K. Relationship between the mean seasonal air temperature in Russia and fluctuations in large-scale atmospheric circulation in the second half of the 20th century. *Trudy VNIIGMI-MCD*, 2012, vol. 176. (In Russian).
5. Polonskij A. B. Atlantic multi-decadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region. *Mor. gidrofiz. zhurn.*, 2008, no. 4, pp. 69—79. (In Russian).
6. Semenov V. A., Cherenkova E. A. Assessment of the influence of the Atlantic multi-decadal oscillation on the large-scale atmospheric circulation in the Atlantic sector in the summer season. *Doklady RAN*, 2018, vol. 478, no. 6, pp. 697—701. DOI: 10.7868/S0869565218060178. (In Russian).

7. Sherstyukov B. G. Analysis of climate changes and their consequences. Trudy VNIIGMI-MCD, 2012, iss. 176. (In Russian).
8. Malinin V. N., Vainovskii P. A. On the causes of the first warming in the Arctic in the 20th century. Uchenye zap. RGGMU, 2018, no. 53, pp. 34—55. (In Russian).
9. Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. Nat. Geosci., 2014, no. 7, pp. 181—184. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>.
10. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K. Atmospheric moisture transport to the Arctic. J. Climate, 2016, no. 29, pp. 5061—5081.
11. Kim B.-M., Hong J.-Y., Jun S.-Y., Zhang X., Kwon H., Kim S.-J., Kim J.-H., Kim S.-W., Kim H.-K. Major cause of unprecedented Arctic warming in January, 2016. Critical role of Atlantic windstorm. Sci. Rep., 2017, no. 7, p. 40051. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep40051>.
12. Vilfand R. M., Strashnaya A. I., Bereza O. V. On the dynamics of agroclimatic indicators of sowing conditions, wintering and the formation of the yield of the main grain crops. Trudy Gidrometcentra Rossii, 2016, iss. 360, pp. 45—78. (In Russian).
13. Martynov A. N., Melnikov E. S., Kovyazin V. F., Anikin A. S., Minaev V. N., Belyaeva N. V. Fundamentals of forestry and forest inventory. St. Petersburg, Lan', 2008, 372 p. (In Russian).
14. Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C., Beck P. S. A., Wilking M., Hallinger M., Blok D., Tape K. D., Rayback S. A., Macias-Fauria M., Forbes B. C., Speed J. D. M., Boulanger-Lapointe N., Rixen C., Lévesque E., Schmidt N. M., Baitinger C., Trant A. J., Hermanutz L., Collier L. S., Dawes M. A., Lantz T. C., Weijers S., Jørgensen R. H., Buchwal A., Buras A., Naito A. T., Ravolainen V., Schaepman-Strub G., Wheeler J. A., Wipf S., Guay K. C., Hik D. S., Vellend M. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. Nat. Clim. Change, 2015, no. 5, pp. 887—891.
15. Salmon V. G., Breen A. L., Kumar J., Lara M. J., Thornton P. E., Wullschleger S. D., Iversen C. M. Alder distribution and expansion across a tundra hillslope: implications for local N cycling. Front. Plant Sci., 2019, no. 10, p. 1099. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01099>.
16. Titkova T. B., Vinogradova V. V. The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century. Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 75—86. (In Russian).
17. Titkova T. B., Vinogradova V. V. Climate changes in the transitional natural zones of northern Russia and their manifestation in the spectral characteristics of landscapes. Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310—323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310. (In Russian).
18. Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia. Polar Science, 2021, Febr. 11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>.
19. Fatichi S., Pappas C., Ivanov V. Modeling plant–water interactions: an ecohydrological overview from the cell to the global scale. WIREs Water, 2016, vol. 3, pp. 327—368. DOI: 10.1002/wat2.1125.
20. Olchev A. V., Deshcherevskaya O. A., Kurbatova Y. A., Molchanov A. G., Novenko E. Y., Pridacha V. B., Sazonova T. A. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange in the forest ecosystems of southern taiga under climate change. Doklady Biological Sciences, 2013, vol. 450, pp. 173—176. DOI: 10.1134/S0012496613030216.
21. Kononova N. K., Samohina O. F. Fluctuations in air temperature at high latitudes of Russia and their relationship with atmospheric circulation in the northern hemisphere. Fundam. i Prikladnaya klimatologiya, 2017, no. 3, vol. 3, pp. 28—56. (In Russian).
22. Tunaev E. L., Gorbatenko V. P., Podnebesnyh N. V. Features of cyclogenesis over the territory of Western Siberia for the period 1976—2015. Trudy Gidrometeor. nauch.-issled. tsentra Rossiiskoi Federatsii, 2017, no. 364, pp. 81—92. (In Russian).
23. Zamolodchikov D. G. Assessment of climatogenic changes in the diversity of tree species based on forest inventory data. Uspekhi sovremennoi biologii, 2011, vol. 131, no. 4, pp. 382—392. (In Russian).
24. Rusanova G. V. Soils of relict spruce islands in the northwest of the Bolshezemelskaya tundra. Lesovedenie, 2006, no. 2, pp. 21—25. (In Russian).
25. Kravtsova V. I., Loshkareva A. R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations. Russian J. Ecology, 2013, no. 4, pp. 303—311. DOI: 10.1134/S1067413613040085.

### Information about the authors

**Titkova, Tatiana Borisovna**, PhD of Geography, Senior Researcher, Laboratory of Climatology, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: [titkova@igras.ru](mailto:titkova@igras.ru); [ttitkova@yandex.ru](mailto:ttitkova@yandex.ru).

**Zolotokrylin, Alexander Nikolaevich**, Doctor of Geography, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Climatology, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: [azolotokrylin1938@yandex.ru](mailto:azolotokrylin1938@yandex.ru).

### Bibliographic description of the article

**Titkova, T. B., Zolotokrylin, A. N.** Regional unevenness of the summer warming in the continental Arctic as an indicator of natural boundaries of northern landscapes. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 386—396. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.

© Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., 2021