

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.582.2

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕХОДНАЯ ЗОНА СЕВЕРА РОССИИ В ЛЕТНИХ УСЛОВИЯХ

© 2021 г. Т. Б. Титкова^а, *, А. Н. Золотокрылин^а, **

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: titkova@igras.ru

**e-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Работа посвящена определению климатической переходной зоны севера России по комплексу климатических индикаторов и характеристик подстилающей поверхности и ее мониторингу в летний период на основе градиентного анализа. Рассматривается территория европейской части России и Западной Сибири севернее 56° с.ш., которая характеризуется циклонической активностью на Арктическом фронте в летний период. Переходная климатическая зона на севере России может выделяться одним или двумя индикаторами. В локальных геосистемах эти индикаторы могут меняться и дополнять друг друга. На данной территории выделяются два ключевых района, которые хорошо выражены по большинству параметров. Один из районов находится на северо-востоке европейской части России в районе Большеземельской и Ямальной тундры. Он обусловлен циклонической активностью на Арктическом фронте, выделяется областями максимальных градиентов температуры, коэффициента увлажнения, эвапотранспирации (Ev) и вегетационного индекса (NDVI) и приходится на ландшафты южной тундры, лесотундры и северной тайги (66°–67° с.ш.). Второй ключевой район расположен в среднетаежной зоне Западной Сибири и ограничен с севера Сибирскими Увалами. Здесь прослеживается область повышенной повторяемости циклонов (62°–63° с.ш.). Этот район также характеризуется повышенными горизонтальными контрастами температуры, коэффициента увлажнения, Ev и NDVI. Здесь зона максимальных градиентов Ev и NDVI протянулась сплошной полосой между Обью и Енисеем, усиливаясь на некоторых участках. Значимый тренд локализации климатической переходной зоны по ее индикаторам отсутствует. В зависимости от климатических условий значения максимальных градиентов параметров могут усиливаться или ослабевать.

Ключевые слова: переходная климатическая зона, градиенты, температура, осадки, эвапотранспирация, NDVI, Арктический фронт, циклоническая активность, север России

DOI: 10.31857/S2587556621040142

ВВЕДЕНИЕ

Переходная климатическая зона — это территория быстрой смены климатических условий на сравнительно коротких расстояниях, что приводит к качественному изменению ландшафтных характеристик. Она характеризуется сильными горизонтальными градиентами климатических переменных, таких как температура, влажность приземного воздуха и осадков, а также контрастами растительности в связи с нестабильностью климатических условий. Анализ динамики таких ландшафтов (*transitional climate zones*, TCZ) (Беличко, 2002; Коломыц, 1987; Myers-Smith, Hik, 2018; Pastick et al., 2019) в разных частях мира показывает их чувствительность к климатическим изменениям (Fu, 1992; Krajick, 2018; Lin et al., 2017; Seager et al., 2018).

Переходные климатические зоны часто образуются в зоне действия климатологических фронтов, например Арктического, а также в районах высокой повторяемости циклонов (штормтреки). Арктический фронт (АФ) на севере России в летний период в своей западной части размещается над морями Северной Атлантики, а в восточной проходит над севером Евразийского континента. Он выражен в приземном слое повышенными градиентами температуры, максимальными значениями среднесезонного модуля адвекции тепла. В зоне АФ происходит быстрая смена лесотундрового редколесья на кустарничково-моховую растительность северной тундры, обусловленная транзитным характером климатических условий. При этом на фоне продолжающегося потепления положение АФ за последние 30 лет остается стабильным и, вероят-

но, останется таковым до 2060 г. (Черенкова и др., 2014).

Район с повышенной повторяемостью центров циклонов на изобарической поверхности Н1000 (гПа), связанный с ведущими модами циркуляции в Атлантико-Европейском секторе (Бардин и др., 2015), локализуется в северной части Евразии над сушей в районе 57°–60° с.ш. на европейской части России, а в Западной Сибири — на 62°–64° с.ш. На европейской части он находится в зоне смены южнотаежных лесов на среднетаежные, а в Западной Сибири — в области перехода среднетаежных лесов к северотаежным. Циклоническая активность в этом районе выше в отрицательную фазу Северо-Атлантического колебания (САК). В этом аспекте особый интерес представляет повышенный циклогенез на европейской части России, а также в Западной и Средней Сибири (Бардин и др., 2015).

В условиях воздействия АФ формируется климатическая транзитная зона с качественными изменениями растительного компонента ландшафтов на сравнительно коротких расстояниях. Четкость границ этих ландшафтных зон зависит от масштаба. Отчетливая граница по какому-либо параметру на одной шкале может быть неясной при рассмотрении на другом иерархическом уровне (Johnston et al., 1992).

В исследованиях (Дьяконов, 2017) показана высокая информативность нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) как индикатора пространственно-временной организации растительного покрова. Меридиональные градиенты вегетационного индекса значимо возрастают в полосе равнинных ландшафтов южной тундры, лесотундры и северной тайги (Золотокрылин и др., 2014; Callaghan et al., 2011). Это свойство служит индикатором изменений ландшафтной составляющей климатической транзитной зоны, дополняя климатические показатели.

Цель работы: определение северной климатической переходной зоны в области Арктического климатологического фронта и в полосе повышенной повторяемости циклонов в Северной Евразии по комплексу климатических индикаторов и характеристик подстилающей поверхности, ее мониторинг в летний период на основе градиентного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования охватывает равнинные бореальные и субарктические ландшафты европейской части России и Западной Сибири севернее 56° с.ш., что определено положением АФ в летний период.

Для визуализации географического положения АФ использовались работы (Золотокрылин

и др., 2014; Черенкова и др., 2014), где климатологический фронт определен на основе анализа минимальных значений полей приземного давления, области максимальной повторяемости центров циклонов на поверхности Н1000 гПа, максимальных величин горизонтальных градиентов температуры на АТ1000 гПа, модуля адвекции тепла. Подробнее методика расчета характеристик АФ содержится в (Золотокрылин и др., 2014).

Детально исследуются северо-восток европейской части России (Большеземельская тундра) и северная часть Западно-Сибирской равнины от тундровой до среднетаежной зоны.

В качестве климатических индикаторов транзитной зоны используются поля повышенных градиентов температуры и осадков, а также рассчитанный по этим данным градиент коэффициента увлажнения. Дополнительно используются характеристики подстилающей поверхности — повышенные градиенты нормализованного вегетационного индекса NDVI и суммарной эвапотранспирации Ev. NDVI показывает наличие и состояние растительности (относительную биомассу). Эвапотранспирация коррелирует с биопродуктивностью экосистем и характеризует тепло и влагообеспеченность растительности, находясь в прямой зависимости от климатических, почвенных, гидрогеологических условий.

Использовались климатические данные за период 1979–2016 гг. реанализа WATCH (Water and Global Change) проекта Европейского союза (Weedon et al., 2016) для вычисления градиентов температуры (°C) и осадков (мм/месяц) с исходным шагом $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Также по этим данным был рассчитан коэффициент увлажнения, который является показателем соотношения тепла и влаги. Он отображает, насколько велико количество осадков, выпадающих в течение периода в рассматриваемом регионе, что в свою очередь является одним из основных факторов, определяющих преобладающий тип растительности в этой местности. В работе используется коэффициент увлажнения Иванова–Мезенцева (Иванов, 1954; Мезенцев, 1973), который рассчитывается по формуле: $K_{\text{увл}} = P/E$, где P — годовое количество осадков, E — испаряемость за год. Испаряемость — это условная величина, характеризующая максимальное возможное (потенциально возможное, не ограниченное запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях. Имеется в виду, что это испарение с открытой водной поверхности крупного естественного пресноводного водоема либо испарение с избыточно увлажненной почвы.

Мезенцев предложил рассчитывать испаряемость за год (E) через сумму активных температур

выше 10°C : $0.2 \sum T_{10^{\circ}}$; 306 — это коэффициент, учитывающий в общей формуле речной сток. Таким образом, коэффициент увлажнения рассчитывался по формуле:

$$K_{\text{увл}} = \frac{\sum P}{0.2 \sum T_{10^{\circ}} + 306}.$$

Значения коэффициента увлажнения больше 1 характеризуют зоны избыточного увлажнения, меньше единицы — недостаточного, около 1 — оптимального.

Показатели эвапотранспирации подстилающей поверхности являются дополнительным показателем соотношения тепла и влаги для биопродуктивности экосистем. Потенциальная эвапотранспирация обычно вычисляется по методу Пенмана–Монтейта (Monteith, 1985), в основе которого лежит уравнение для расчета испарения с открытой водной поверхности, предложенное Пенманом (Penman, 1948). Для расчетов месячной суммарной эвапотранспирации мы использовали данные модели NLDAS-2 с разрешением $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$. Эта модель является продуктом MERRA-2. Данные доступны с 1982 г. по настоящее время. Modern-Era версии 2 (MERRA-2) — это атмосферный реанализ NASA для спутниковой эры с использованием модели системы наблюдения Goddard Earth, версия 5 (GEOS-5) с ее системой ассимиляции атмосферных данных (ADAS), версия 5.12.4 (https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/FLDAS/FLDAS_NOAH01_C_GL_M.001). Достоинством данных MERRA-2 является то, что этот глобальный реанализ объединяет данные космических наблюдений с данными наземных наблюдений, учитывая физические процессы в климатической системе.

Для определения NDVI используется контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных: поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного сырья в инфракрасном канале. Для анализа NDVI использовались данные MODIS, модель MOD13C2 версии 6 для среднемесячных значений с разрешением $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ за июль 2000–2020 гг. (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>). Ежемесячный продукт принимает все значения MOD13A2, которые перекрывают месяц. Глобальные данные MOD13C1 представляют собой безоблачные пространственные композиты.

Решение задачи состоит в вычислении градиентов июльской температуры воздуха, суммы осадков, коэффициента увлажнения, вегетационного индекса NDVI и суммарной эвапотранспирации E_v с шагом 0.5° по широте и долготе. Под градиентом параметров понимается вектор, характеризующий их изменение на единицу рас-

стояния. Подробно методика расчета градиента климатических параметров приведена в (Титкова и др., 2020). Выделенные зональные полосы значимых градиентов этих параметров (с вероятностью 0.9 по критерию Стьюдента) сравнивались с ландшафтно-экологическим районированием территории (Исаченко, 2001).

Для оценки значимости градиентов и визуализации результатов с разрешением $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ использовался пакет прикладных программ MATLAB.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индикаторы климатической северной переходной зоны

Север европейской части России и Западной Сибири является территорией с избыточным увлажнением, где коэффициент увлажнения больше 1 (рис. 1а). В зоне локализации климатического АФ, а также в полосе с повышенной повторяемостью центров циклонов прослеживаются области с повышенными градиентами коэффициента увлажнения (рис. 1б).

Осадки являются наиболее изменчивым параметром и при достаточном увлажнении в меньшей степени оказывают влияние на ландшафт, чем температура. Поэтому индикатором переходной климатической зоны севера России в большей степени может служить температура. Проявление транзитной переходной зоны в изменении ландшафта отражается в вариациях вегетационного индекса (Титкова, Виноградова, 2019; Lin et al., 2017), так как NDVI достаточно чувствителен к изменениям климата. Еще одним индикатором переходной климатической зоны может являться суммарная эвапотранспирация как характеристика тепло- и влагообеспеченности растительности.

На рис. 1б и 2 показаны средние значения и поля максимальных градиентов обозначенных параметров в зоне летнего АФ. Зоны максимальных градиентов на всем своем протяжении с запада на восток по всем рассматриваемым индикаторам не представляют идеальную зональную полосу и образуют несколько разрозненных пятен максимальных градиентов. Это связано с тем, что положение АФ колеблется в достаточно широком коридоре порядка 5° широты (Черенкова и др., 2014).

В основном зоны максимальных градиентов температуры, осадков, коэффициента увлажнения приурочены к АФ, приходящемуся на лесотундровые ландшафты, и усиливаются близостью береговой линии арктических морей.

Зоны максимальных градиентов NDVI и коэффициента увлажнения связаны как с районами локализации АФ (лесотундровые ландшафты), так и с районом повышенной повторяемости циклонов (северо-таежные ландшафты). АФ на европейской части России лучше согласуется с

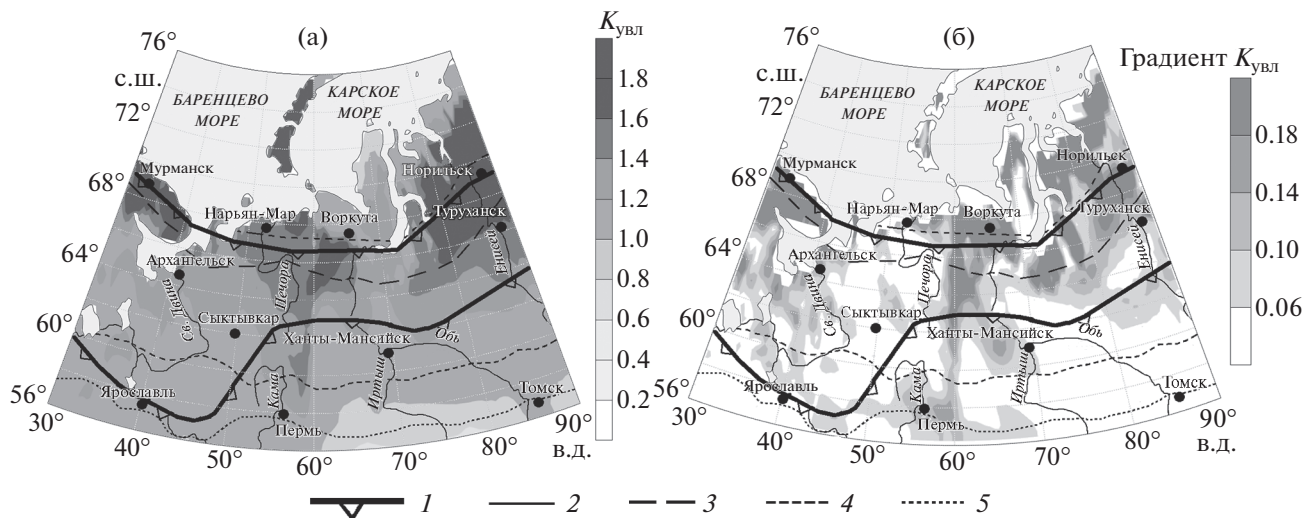


Рис. 1. Коэффициент увлажнения (а) и градиент коэффициента увлажнения (б) по данным WATCH, 1979–2016. 1 – положение двух ветвей АФ летом (Черенкова и др., 2014); границы ландшафтных зон: 2 – тундры, 3 – лесотундры, 4 – северной тайги, 5 – средней тайги.

зоной максимальных градиентов суммарной эвапотранспирации. В Западной Сибири максимальные градиенты E_v и коэффициента увлажнения повышены в районе максимума повторяемости циклонов.

В результате, транзитная климатическая зона в масштабе макрорегионов европейской части России и Западной Сибири может быть обозначена одним или двумя индикаторами. На разных участках эти индикаторы могут меняться и дополнять друг друга.

Характеристика северной климатической переходной зоны в ключевых районах

Рассмотрим транзитную климатическую зону на мезомасштабном уровне в ключевых районах. Ключевые районы определены по полю хорошо выраженных значимых максимальных градиентов анализируемых параметров.

Одним из таких районов является северо-восток европейской части России (Большеземельская тундра) с тундровыми, лесотундровыми и северотаежными ландшафтами. Этот район выделяется однородностью рельефа и приходится на область влияния АФ (рис. 3). Область максимальных градиентов температуры ($>0.4^\circ\text{C}$ на 0.5° широты) выражена достаточно хорошо и приходится на лесотундровую зону. Поле градиентов осадков несколько размыто, что не позволяет выделить обособленную зону, и представлено двумя областями, расположенными севернее и южнее АФ. Лучше всего АФ выражен здесь повышенными градиентами температуры в приземном слое и

максимальными значениями среднесезонного модуля адвекции тепла (Черенкова и др., 2014).

Транзитная зона по градиенту NDVI приходится на границу тундры и лесотундры и прослеживается в виде отдельных фрагментов, усиливаясь на некоторых участках (значимые градиенты $>0.08^\circ\text{C}$ на 0.5° широты). Область максимальных градиентов E_v очень хорошо выражена между северной тайгой и лесотундрой (>0.25 л/м³ в сутки на 0.5° широты), где максимально меняется биопродуктивность экосистем.

На рис. 4 представлена комплексная схема совокупности линий максимальных градиентов климатических показателей и характеристик подстилающей поверхности, которые образуют полновесную климатическую (транзитную) переходную зону. Эта зона проходит в пределах южной тундры, лесотундры и северной границы тайги и находится в районе влияния АФ. Колебания значений максимальных градиентов параметров можно проследить по долготному профилю 55° в.д. (табл. 1). Максимальные градиенты наблюдаются в зоне 66° – 67° с.ш. Широтные градиенты параметров показывают максимум для температуры и NDVI на 67° с.ш., E_v – на 66.5° с.ш., осадков – на 66° с.ш. Таким образом, переходная климатическая зона на северо-востоке европейской части России выделяется областями максимальных градиентов температуры, NDVI и E_v , занимает порядка 2° по широте и приходится на районы южной тундры, лесотундры и северной границы тайги.

Рассмотрим еще один ключевой участок транзитной климатической зоны в среднетаежной зоне Западной Сибири в области повышенной по-

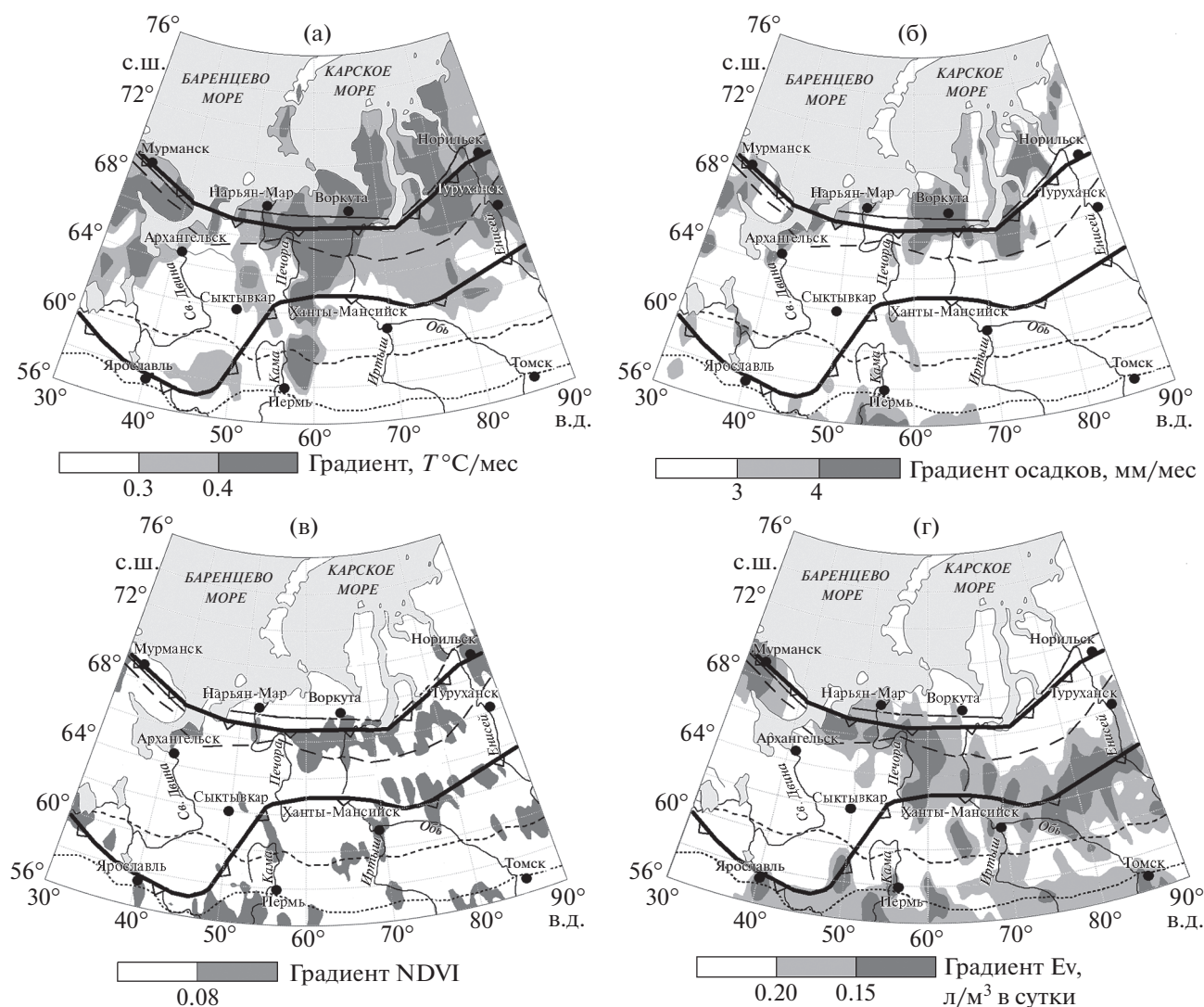


Рис. 2. Поля максимальных градиентов параметров на европейской части России и Западной Сибири, июль: а) температура воздуха, 2000–2016; б) осадки, 2000–2016; в) NDVI, 2000–2020; г) Ev, 2000–2020. Обозначения см. рис. 1.

вторяемости центров циклонов. Зоны значимых максимальных градиентов показаны на рис. 5. Градиенты температуры ($>0.4^{\circ}\text{C}$ на 0.5° широты) прослеживаются на 80° – 83° в.д. в районе 62° с.ш. Поле повышенных градиентов осадков практически не выражено. Напротив, по характеристикам подстилающей поверхности эта переходная область хорошо обозначена. Зона максимальных градиентов NDVI и Ev протянулась сплошной полосой между Обью и Енисеем, усиливаясь на некоторых участках. Комплексная схема совокупности линий максимальных градиентов температуры и характеристик подстилающей поверхности хорошо скомпонована по широте, она проходит между Обью и Енисеем и соответствует полосе повышенной повторяемости циклонов (рис. 6). Профиль вдоль 80° в.д. показывает изменение значений максимальных градиентов параметров

в переходной климатической зоне. Широтные градиенты климатических параметров максимальны для температуры и Ev на 62.5° с.ш., NDVI на 63° с.ш. (см. табл. 1). В итоге можно сказать, что переходная климатическая зона в Западной Сибири в области активной циклоничности, целиком расположенная в северо-таежных ландшафтах в районе 62° – 63° с.ш., наиболее ярко выделяется областями максимальных градиентов Ev и NDVI.

Если рассматривать размещение максимальных градиентов параметров в среднем по десятилетиям (рис. 7), то видно, что климатическая переходная зона не меняет своей локализации для температуры, NDVI и Ev в северных районах европейской части и Западной Сибири. Для осадков она может смещаться в пространстве год от года.

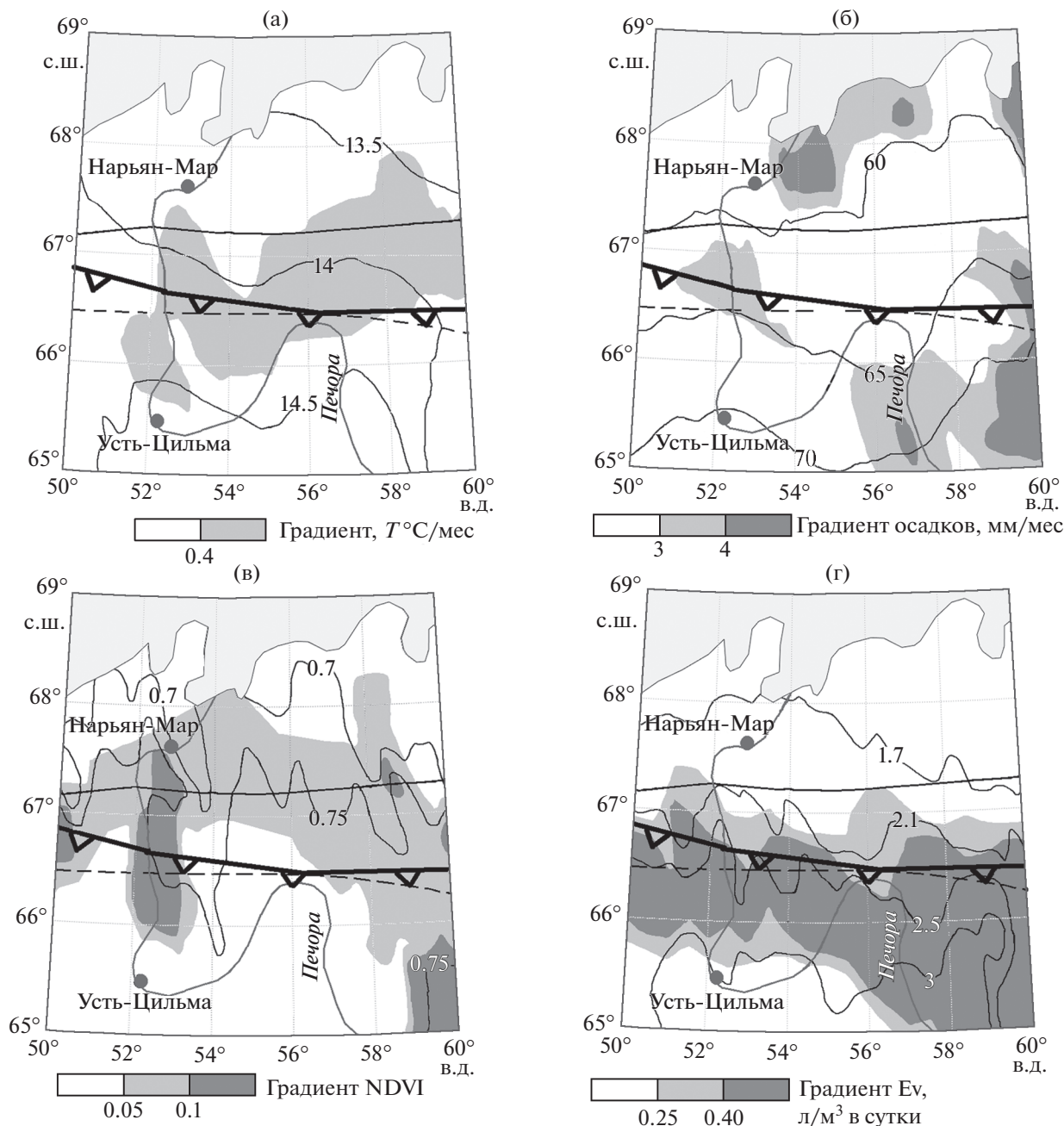


Рис. 3. Средние значения (изолинии) и поля максимальных градиентов параметров на северо-востоке европейской части России, июль: а) температура воздуха, °С; б) осадки, мм; в) NDVI; г) E_v , л/м³ в сутки. Обозначения см. рис. 1.

В зависимости от климатических условий значения максимальных градиентов параметров могут усиливаться или ослабевать, что показывают градиенты температуры. Это можно подтвердить простым сравнением средних температур десятилетий для станций, расположенных севернее и южнее локализации переходной зоны в Западной Сибири (табл. 2). В десятилетие 1991–2000 гг. разница температур для этих станций была макси-

мальна, что отразилось на значениях градиентов параметров.

Наиболее стабильными индикаторами являются характеристики подстилающей поверхности NDVI и E_v . На европейской части колебания интенсивности градиента E_v практически отсутствуют на всем профиле, а в Западной Сибири градиенты E_v более чувствительны к климатическим условиям.

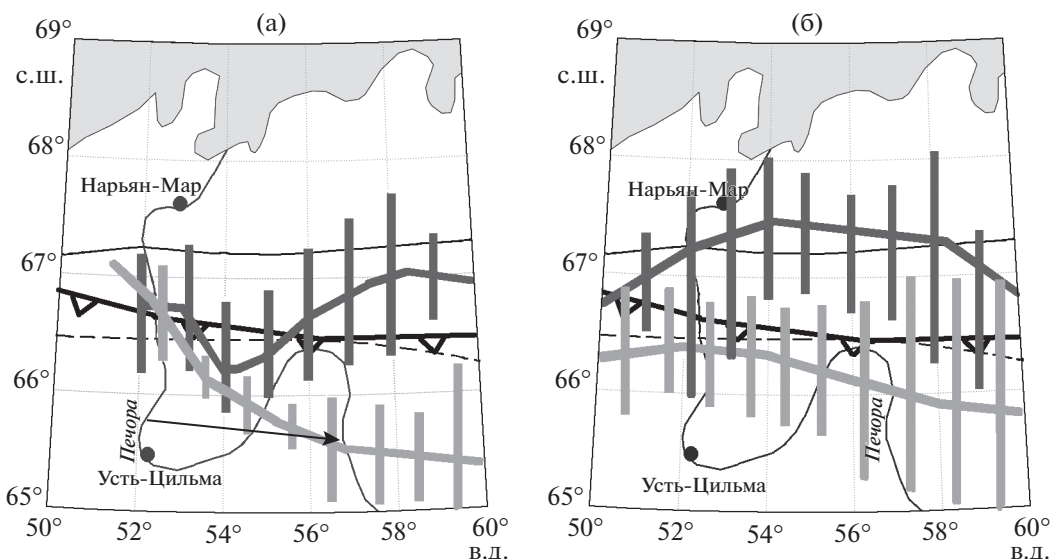


Рис. 4. Климатическая переходная зона на северо-востоке европейской части России, максимальные градиенты с их доверительными интервалами, июль: а) климатические параметры, 2000–2016 (темно-серые линии — максимальные градиенты температуры воздуха, светло-серые — осадков); б) характеристики подстилающей поверхности, 2000–2020 (темно-серые линии — максимальные градиенты NDVI, светло-серые — E_v). Обозначения см. рис. 1.

ВЫВОДЫ

На территории с недостатком теплообеспеченности и избыточным увлажнением индикаторами климатической переходной зоны являются повышенные градиенты температуры и — в большей степени — градиенты характеристик подстилающей поверхности, которые хорошо согласуются с АФ и районом повышенной повторяемости циклонов.

Переходная климатическая зона на севере европейской части России и Западной Сибири может быть выделена одним или двумя индикатора-

ми. На разных участках эти индикаторы могут меняться и дополнять друг друга. В ключевых районах переходная (транзитная) климатическая зона достаточно хорошо выражена по большинству параметров.

Ключевой район в Большеземельской тундре обусловлен АФ. Он выделяется областями максимальных градиентов температуры, коэффициента увлажнения, E_v и NDVI, локализуется на 66° – 67° с.ш. и приходится на ландшафты южной тундры, лесотундры и северной границы тайги.

Второй ключевой район расположен в средне-таежной зоне Западной Сибири в полосе повы-

Таблица 1. Широтные градиенты параметров на равнинных территориях по профилям

Широта	Градиент $T^{\circ}\text{C}$	Градиент осадков, мм	Градиент NDVI	Градиент E_v , л/м ³ в сутки	Широта	Градиент $T^{\circ}\text{C}$	Градиент осадков, мм	Градиент NDVI	Градиент E_v , л/м ³ в сутки
55° в.д.					80° в.д.				
68	0.2	2.6	0.07	0.17	64	0.2	0.7	0.01	0.42
67.5	0.4	1.8	0.02	0.08	63.5	0.3	0.7	0.06	0.51
67	0.5*	1.1	0.03*	0.08	63	0.4	1.7	0.17*	0.59
66.5	0.4	2.4	0.01	0.85*	62.5	0.5*	1.2	0.08	0.76*
66	0.4	3*	0.02	0.42	62	0.4	1	0.06	0.25
65.5	0.3	2.8	0.04	0.08	61.5	0.3	0.4	0.08	0.76
65	0.2	2.6	0.01	0.17	61	0.2	0.5	0.05	0

* Градиент значим с вероятностью 0.9 по критерию Стьюдента.

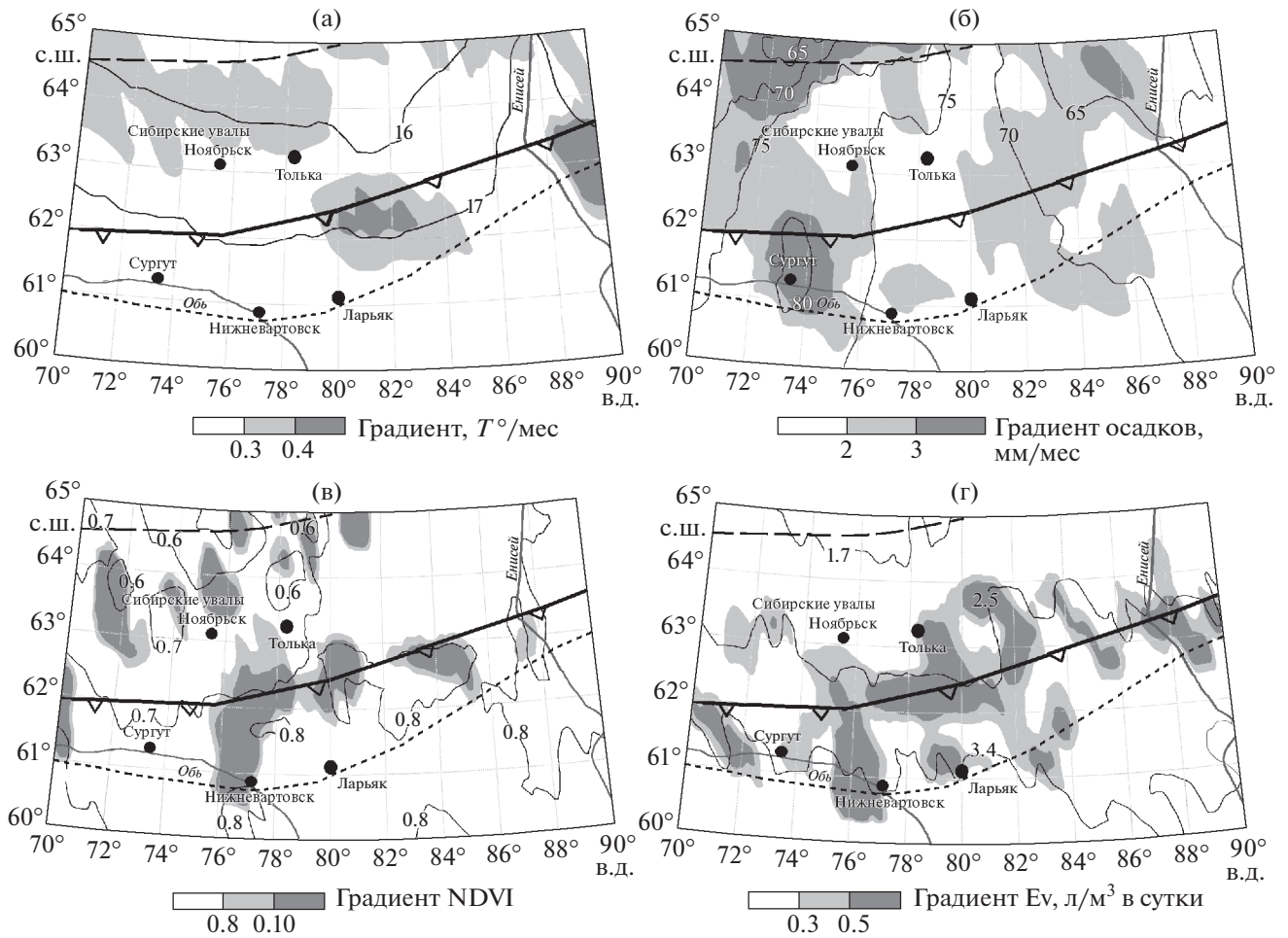


Рис. 5. Средние значения (изолинии) и поля максимальных градиентов параметров на севере Западно-Сибирской равнины, июль: а) температура воздуха, °С; б) осадки, мм; в) NDVI; г) E_v , л/м³ в сутки. Обозначения см. рис. 1.

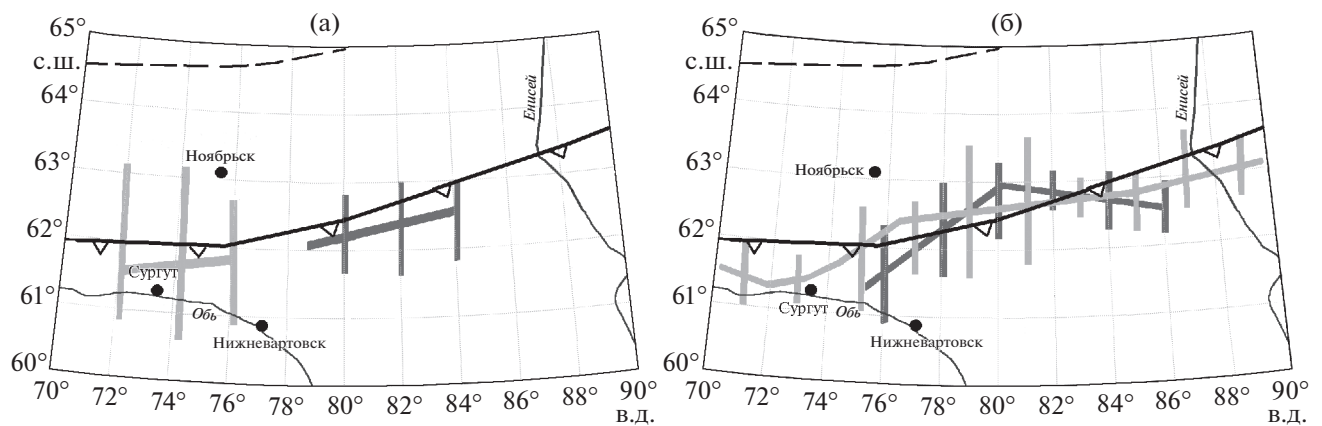
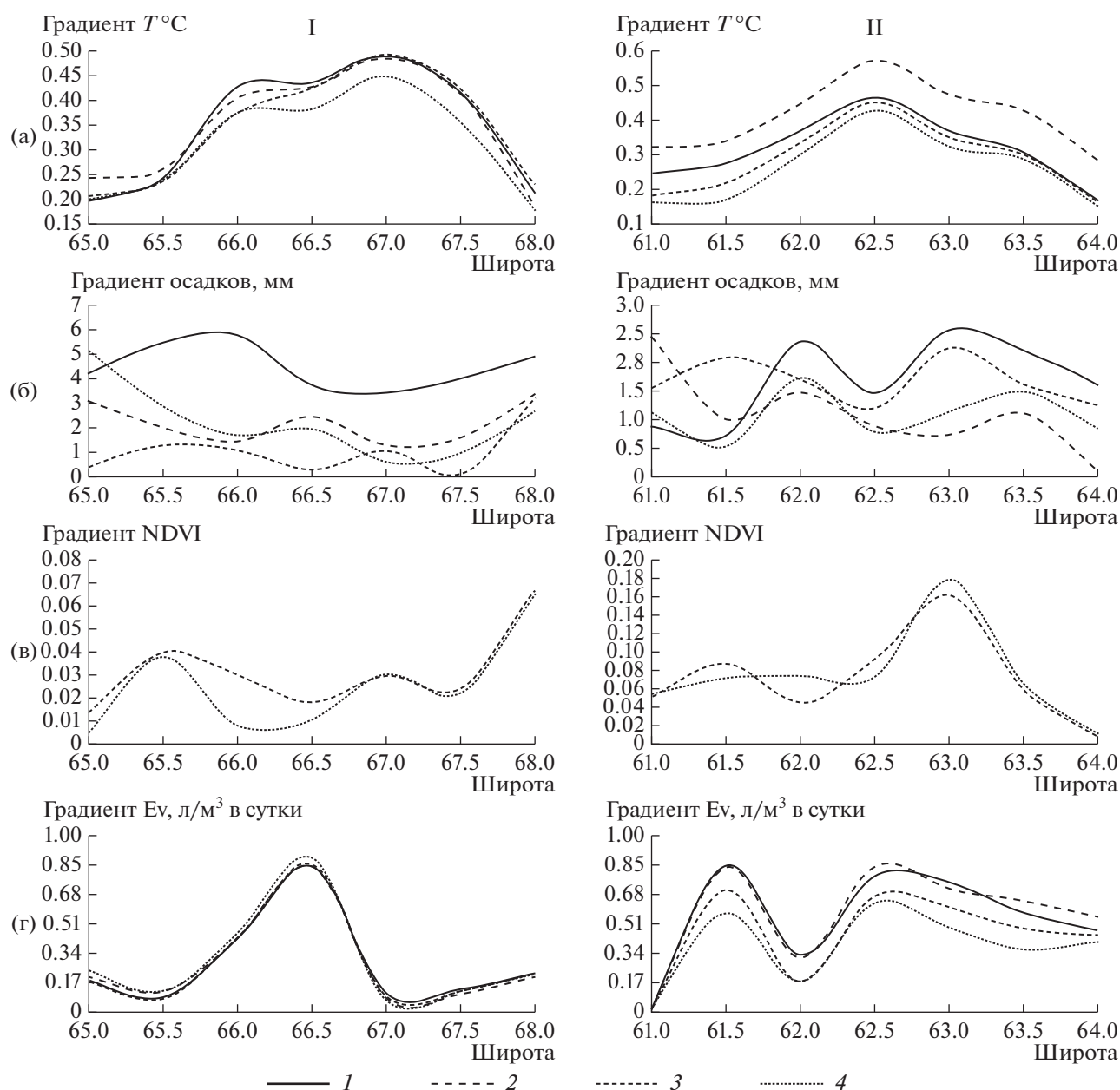


Рис. 6. Климатическая переходная зона на севере Западно-Сибирской равнины, максимальные градиенты с их доверительными интервалами, июль: а) климатические параметры 2000–2016 (темно-серые линии – максимальные градиенты температуры воздуха, светло-серые – осадков); б) характеристики подстилающей поверхности, 2000–2020 (темно-серые линии – максимальные градиенты NDVI, светло-серые – E_v). Обозначения см. рис. 1.

Таблица 2. Средняя температура десятилетий по станциям севернее и южнее области локализации переходной зоны в Западной Сибири

Станция	Широта	Долгота	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2018
Толька	64°00′	82°03′	17.2	16.7	16.4	16.9
Ларьяк	61°06′	80°15′	18.3	18.4	17.9	18.1
$\Delta T^{\circ}\text{C}$			1.1	1.7	1.5	1.2

**Рис. 7.** Изменение широтных градиентов параметров (I) на профиле 55° в.д. (северо-восток европейской части России), (II) на профиле 80° в.д. (Западная Сибирь) по десятилетиям на 0.5° широты: а) температура, б) осадки, в) NDVI, г) Ev. 1 – 1981(1982)–1990, 2 – 1991–2000, 3 – 2001–2010, 4 – 2011–2018(2020).

шенной повторяемости циклонов, колеблется в районе 62°–63° с.ш. и обозначен в большей степени повышенными градиентами коэффициента увлажнения, NDVI и Ev.

Локализация климатической переходной (транзитной) зоны на севере равнинной России неизменна по ее индикаторам: температуре, NDVI и Ev. В зависимости от климатических условий значения максимальных градиентов параметров могут усиливаться или ослабевать.

Таким образом, в результате картографического сравнения зон максимальных июльских градиентов температуры, коэффициента увлажнения, NDVI, Ev можно сделать вывод о качественном соответствии размещения контрастных полос. Это позволяет рассматривать их как индикаторы климатической переходной зоны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в Институте географии РАН по теме госзадания № 0148-2019-0009 “Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России”.

FUNDING

The research was carried out at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state-ordered research theme no. 0148-2019-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 14–40.
- Величко А.А. Устойчивость ландшафтной оболочки и ее био-георазнообразие в свете динамики широтной зональности // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2002. № 5. С. 7–21.
- Дьяконов К.Н., Варлыгин Д.Л., Ретеюм А.Ю. Влияние океанов на физико-географическую зональность по спутниковым данным о фотосинтезе // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География*. 2017. № 2. С. 11–15.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю. Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой // *Лёд и Снег*. 2014. № 1. С. 80–85.
- Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // *Изв. ВГО*. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
- Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб., 2001. 328 с.
- Коломыц Э.Г. Ландшафтные исследования в переходных зонах. М.: Наука, 1987. 120 с.
- Мезенцев В.С. Водный баланс. Новосибирск, 1973. 229 с.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310>
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Климатический рубеж в Северном Прикаспии: индикаторы и размещение // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. № 6. С. 864–873. <https://doi.org/10.31857/S2587556620050167>
- Черенкова Е.А., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю. Сезонные особенности арктического фронта на территории России в XX и XXI веках // *Криосфера Земли*. 2014. Т. 18. № 4. С. 78–85.
- Callaghan T.V., Velichko A.A., Borisova O.K. Tundra in a changing climate // *GES*. 2011. V. 4. № 3. P. 4–18. https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v04_2011_01
- Fu C. Transitional Climate Zones and Biome Boundaries: A Case Study from China // *Landscape Boundaries. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)* / Hansen A.J., di Castri F. (Eds.). NY: Springer, 1992. P. 394–402. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2804-2_20
- Johnston C.A., Pastor J., Pinay G. Quantitative Methods for Studying Landscape Boundaries // *Landscape Boundaries. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)* / Hansen A.J., di Castri F. (Eds.). NY: Springer, 1992. P. 107–125.
- Krajick K. The 100th Meridian, Where the Great Plains Begin, May Be Shifting. Columbia University Blog, 2018. <http://blogs.ei.columbia.edu/2018/04/11/the-100th-meridian-where-the-great-plains-used-to-begin-now-moving-east/>
- Wang L., Chen W., Huang G., Zeng G. Changes of the transitional climate zone in East Asia: past and future // *Clim. Dyn.* 2017. № 49. P. 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3400-4>
- Monteith J.L. Evaporation from land surface: progress in analysis and prediction since 1948 // *Advances in Evapotranspiration. Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration, Chicago, Ill. ASAE. Michigan: St. Joseph*, 1985. P. 4–12.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance // *J. Ecol.* 2018. № 106. P. 547–560.
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska // *Glob. Change Biol.* 2019. № 25. P. 1171–1189.
- Penman H.L. Natural Evaporation from open water, bare soil and grass // *Proc. Roy. Soc. London*: A193. 1948. P. 120–146.
- Seager R., Feldman J., Lis N., Ting M., Williams A.P., Nakamura J., Liu H., Henderson N. Whither the 100th Meridian? The Once and Future Physical and Human Geography of America's Arid–Humid Divide // *Earth Interact.* 2018. № 22 (5). P. 1–24. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/EI-D-17-00111>
- Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P. WATCH // *Water and Global Change*. 2016. № 5. May. <http://www.eu-watch.org/> <https://doi.org/10.1002/2014WR015638>

Transitional Climate Zone of the Russian North in Summer Conditions

T. B. Titkova¹, * and A. N. Zolotokrylin¹, **

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: titkova@igras.ru*

***e-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru*

This paper is concerned with the definition of the transitional climate zone of the Russian North through a complex of climate indicators and characteristics of the underlying surface, and its monitoring in the summer period based on the gradient analysis. The European part of Russia and Western Siberia north of 56° N are explored. These regions were determined by a cyclonic activity in Arctic front and notable cyclone repeatability in the summer period. The transitional climate zone in the Russian North can be identified by one or two indicators. On adjacent areas, these indicators can alternate and complement each other. Two key regions are distinguished on this territory. They are well defined by most of the parameters. One of these regions is situated in the northeast of the European part of Russia (Bolshezemelskaya and Yamalskaya tundras); it is determined by the cyclonic activity in Arctic front. It differentiates by areas with maximal gradients of temperature, humidity ratio, evapotranspiration (Ev), and NDVI, which are situated in 66°–67° N (landscapes of southern tundra, forest tundra, and border of northern taiga). The second key region is in the middle taiga zone of Western Siberia (62°–63° N), where the increased cyclone repeatability influences it, and it is characterized by horizontal contrasts of temperature, humidity ratio, NDVI and Ev. Here a zone of maximal gradients of Ev, and NDVI stretches between Ob and Yenisei rivers, strengthening in some areas. There is no significant trend of localization of the transitional climate zone on its indicators. According to climate conditions, maximal gradients of parameters can strengthen or weaken.

Keywords: transitional climatic zone, gradients, temperature, precipitation, evapotranspiration, NDVI, Arctic front, cyclonic activity, Northern Russia

REFERENCES

- Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Features of the variability of cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading circulation modes in the Atlantic-European sector. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2015, vol. 2, pp. 14–40. (In Russ.).
- Callaghan T.V., Velichko A.A., Borisova O.K. Tundra in a changing climate. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 4–18. doi: 10.15356/2071-9388_03v04_2011_01
- Cherenkova E.A., Titkova T.B., Mikhailov A.Yu. Seasonal features of the Arctic front in Russia in the XX and XXI centuries. *Kriosfera Zemli*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 78–85. (In Russ.).
- Diakonov K.N., Varlygin D.L., Reteyum A.Yu. Influence of the oceans on physical and geographical zoning according to satellite data on photosynthesis. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 2, pp. 11–15. (In Russ.).
- Fu C. Transitional climate zones and biome boundaries: A case study from China. In *Landscape Boundaries*. Hansen A.J., di Castri F., Eds. New York: Springer, 1992, pp. 394–402. doi 10.1007/978-1-4612-2804-2_20
- Isachenko A.G. *Ekologicheskaya geografiya Rossii* [Ecological Geography of Russia]. St. Petersburg: S.-Peterb. Gos. Univ., 2001. 328 p.
- Ivanov N.N. On the determination of evaporation values. *Izv. Vses. Geogr. O-va*, 1954, vol. 86, no. 2, pp. 189–196. (In Russ.).
- Johnston C.A., Pastor J., Pinay G. Quantitative methods for studying landscape boundaries. *Landscape Boundaries*. Hansen A.J., di Castri F., Eds. New York: Springer, 1992, pp. 107–125.
- Kolomyts E.G. *Landshaftnye issledovaniya v perekhodnykh zonakh* [Landscape Research in Transition Zones]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 120 p.
- Krajick K. The 100th Meridian, Where the Great Plains Begin, May Be Shifting. Columbia University Blog, 2018. Available at: <http://blogs.ei.columbia.edu/2018/04/11/the-100th-meridian-where-the-great-plains-used-to-begin-now-moving-east/> (accessed: 25.06.2021).
- Mezentsev V.S. *Vodnyi balans* [Water Balance]. Novosibirsk, 1973. 229 p.
- Monteith J.L. Evaporation from land surface: progress in analysis and prediction since 1948. In *National Conference on Advances in Evapotranspiration, Hyatt Regency Chicago, Ill. (USA), 16-17 Dec 1985*. ASAE, 1985, pp. 4–12.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance. *J. Ecol.*, 2018, vol. 106, pp. 547–560.
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. *Glob. Change Biol.*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 1171–1189.
- Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A*, 1948, vol. 193, pp. 120–146.
- Seager R., Lis N., Feldman J., Ting M., Williams A.P., Nakamura J., Liu H., Henderson N. Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America's arid–humid divide. *Earth Interactions*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 1–24. doi 10.1175/EI-D-17-0011.1
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and

- their display in landscape spectral characteristics. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310–323. (In Russ.). doi 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Climatic transition zone in the steppe zone of the East European Plain: indicators and location. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 864–873. (In Russ.). doi 10.31857/S2587556620050167
- Velichko A.A. Stability of the landscape envelope and its bio-geodiversity in the light of the dynamics of latitudinal zoning. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 5, pp. 7–21. (In Russ.).
- Wang L., Chen W., Huang G., Zeng G. Changes of the transitional climate zone in East Asia: past and future. *Clim. Dyn.*, 2017, vol. 49, pp. 1463–1477. doi 10.1007/s00382-016-3400-4
- Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resour. Res.*, 2014, vol. 50, pp. 7505–7514. doi 10.1002/2014WR015638
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Mikhailov A.Yu. Climatic variations of the Arctic front and ice extent of the Barents Sea in winter. *Led i Sneg*, 2014, no. 1, pp. 80–85. (In Russ.).