

Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата

В. И. Горный, А. В. Киселев, С. Г. Крицук, И. Ш. Латыпов, А. А. Тронин

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

В работе проанализированы особенности пространственно-временной динамики температуры подстилающей поверхности (ПП) Северной Евразии как реакции на изменение климата и антропогенное воздействие. Для построения картосхем скорости изменения температуры ПП и тренда продолжительности вегетационного периода использованы стандартные продукты, подготовленные NASA на основе материалов съёмки спутниками Terra и Aqua (инструмент MODIS) за период с 2002 по 2020 г. При построении цифровых картосхем использовался попиксельный регрессионный анализ. Построены цифровые картосхемы трендов средней температуры ПП, самого тёплого месяца и продолжительности вегетационного периода. Результаты показали, что для территории Северной Евразии не наблюдается общей тенденции к повышению температуры ПП. Вместо этого выявлена регулярная система обширных областей нагрева и остывания ПП. Выполнено сравнение с картами трендов температуры приземного воздуха, построенными Росгидрометом на основе данных регулярных наблюдений на метеостанциях. Полученный в настоящей работе результат противоречит существующим выводам климатологов, основанным на результатах многолетних наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях. Предложена гипотеза активизации общей атмосферной циркуляции в ячейке Ферреля, объясняющая выявленное противоречие.

Ключевые слова: Северная Евразия, атмосфера, экосистемы, спутник, температура, картирование, многолетние тренды, глобальное потепление

Одобрена к печати: 29.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164

Введение

Климатический реанализ многолетних измерений сети из 702 метеостанций России, стран СНГ и Балтии показал, что на территории России с 1976 по 2019 г. в летний период происходил рост температуры воздуха со скоростью $0,39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (Доклад..., 2021). Но ещё академик К. Я. Кондратьев отмечал, что в связи с формированием над городами «тепловых островов» прогнозы глобального потепления, полученные с помощью физических многопараметрических моделей и опирающиеся на данные мировой сети метеорологических наблюдений, могут быть завышены (Кондратьев, 2004; Демирчан и др., 2010). Дополнительным спорным моментом, отмеченным К. Я. Кондратьевым, оказался субъективный выбор значений параметров многопараметрических физических моделей (Кондратьев, 2004).

Известно, что при столкновении различных научных позиций целесообразно выполнить проверку каждой из них наблюдениями с применением иных технических средств и/или методик. При этом нужно планировать эксперимент или наблюдения таким образом, чтобы выявлялись не монотонные количественные изменения характеристик исследуемых явлений или эффектов, а их качественный скачок. Например, переход от положительных значений тренда температуры к отрицательным.

Представляется, что накопленные за последние двадцать лет обширные архивы материалов ежедневных тепловых космических съёмок, выполненных спутниками системы EOS (*англ.* Earth Observing System), могут быть независимыми от результатов стандартных метеорологических наблюдений источником информации о тепловых процессах в экосистемах, отражающих многолетние тенденции в изменениях температуры воздуха. Учитывая глобальный

масштаб атмосферных процессов, определяющих динамику температуры воздуха, исследование необходимо проводить на территории континентального масштаба.

Таким образом, цель статьи состоит в независимом от результатов наблюдений на метеостанциях анализе особенностей пространственно-временной динамики температуры подстилающей поверхности (ПП) Северной Евразии как реакции на изменение температуры воздуха в свете научного конфликта, сформулированного К. Я. Кондратьевым.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана территория Северной Евразии, включающая протянувшиеся в широтном направлении природные зоны арктических пустынь, тундры, тайги, смешанных и лиственных лесов, лесостепей и степей. Предполагалось, что выявление в температуре ПП Северной Евразии региональных пространственных структур, не совпадающих с границами природных зон, будет указывать на термическое воздействие атмосферы на экосистемы.

Для анализа изменений температуры ПП на территорию Северной Евразии использованы стандартные продукты: цифровые карты термодинамической температуры земной поверхности (MOD11A1, <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006/>; MYD11A1, <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd11a1v006/>), восстановленной по материалам космических съёмок спектрорадиометром MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Aqua и Terra), имеющем инфракрасные-тепловые спектральные каналы. Каждый из этих спутников выполняет съёмку дважды в сутки (Aqua — в полуденное время и ночью; Terra — утром и вечером). Таким образом, два спутника производят четыре ежедневных измерения теплового излучения ПП. Температурная чувствительность инфракрасных датчиков спектрорадиометра MODIS составляет 0,05–0,07 К (Xiong et al., 2008). Пространственное разрешение этих материалов — $\sim 1 \times 1$ км.

Для каждого пикселя в сцене рассчитано среднесуточное значение температуры ПП как результат осреднения четырёх ежедневных спутниковых измерений. Далее, для каждого пикселя карты Северной Евразии строились временные ряды ежедневных среднесуточных температур земной поверхности в период с 2003 по 2020 г. Общее количество проанализированных сцен в ряду — более 10 000. Каждая сцена стандартно состоит из 23 гранул размером 1200×1200 точек. Полученные временные ряды анализировались отдельно и независимо друг от друга. В каждом временном ряду с помощью плавающего окна шириной 31 день находились даты начала и окончания периода вегетации для каждого года — даты, когда средняя температура ПП, вычисленная в данном окне, переходит через границу в $+10^\circ\text{C}$ (*рис. 1*).



Рис 1. Принцип выбора максимальной за 31-дневный период температуры ПП.
1 — среднесуточная температура ПП, 2 — среднемесячная температура ПП

Для каждого года в рассматриваемом интервале с 2003 по 2020 г. рассчитана продолжительность вегетационного периода τ в днях как разность между датой окончания и датой начала этого периода, а также средняя (T_{cp}) и накопленная ($T_{\text{н}}$) температура поверхности в течение этого периода:

$$T_{\text{н}} = \sum_i^{\tau} T_i, \quad T_{\text{cp}} = \frac{T_{\text{н}}}{\tau},$$

где T_i — среднесуточная температура в течение i -го дня вегетационного периода.

Полученные величины τ , T_{cp} и $T_{\text{н}}$ формируют временные ряды с единственным значением дистанционно измеренной характеристики для каждого года. С целью выявления характера долговременного изменения температуры в каждой точке поверхности на территории северной Евразии с 2003 по 2020 г. эти ряды анализировались с применением линейного регрессионного анализа. Поскольку рассматриваемая территория имеет большие размеры и занимает значительную часть континента, а разрешение исходных данных составляет всего лишь 1 км, то для повышения достоверности результатов и снижения ошибок регрессий для анализа временных рядов использовались блоки размером 3×3 пикселя.

Примеры графиков регрессионных зависимостей для некоторых точек карты, иллюстрирующие снижение и рост средних температур за последние 20 лет, приведены на рис. 2. Угловой коэффициент наклона линии тренда пропорционален скорости изменения температуры ПП в данной точке цифровой карты, а знак этой величины показывает направление изменения (рост или уменьшение).

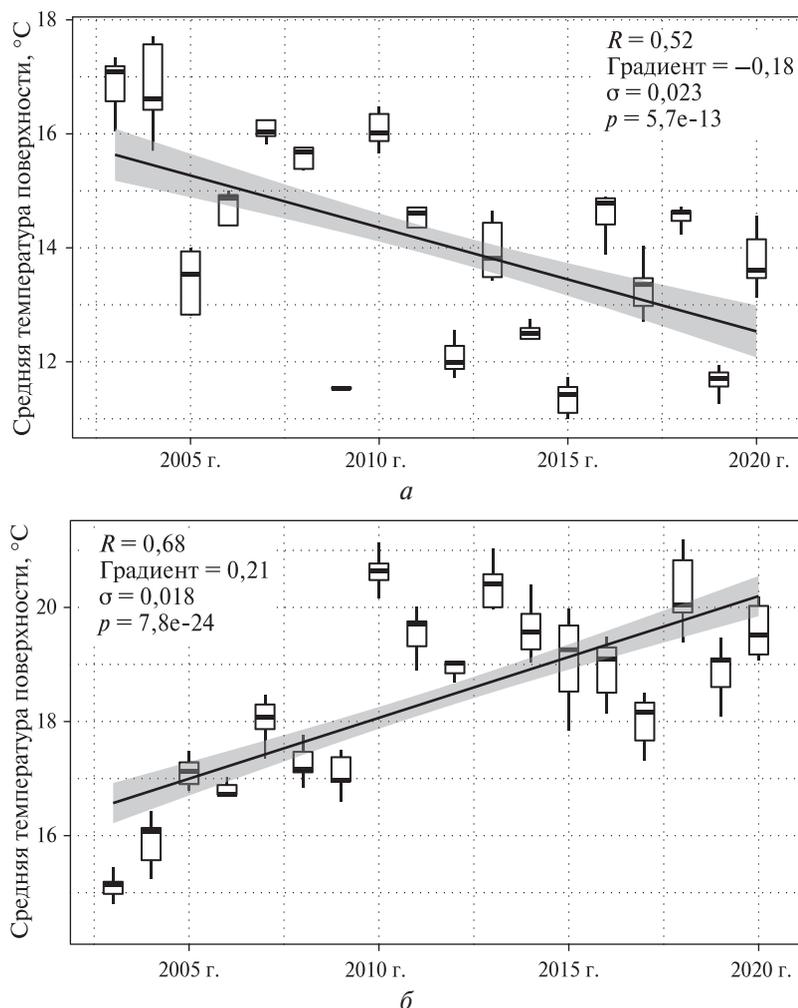


Рис. 2. Пример регрессионного анализа скоростей изменения температур ПП: а — отрицательный тренд (Республика Коми); б — положительный тренд (Воронежская обл.)

Эти угловые коэффициенты нанесены на цифровую карту (рис. 3а, 4а, см. с. 159). Для оценки надёжности и достоверности определения параметров линейной модели для каждого углового коэффициента вычислены статистические характеристики: коэффициент вариации и *p*-значение (англ. *p*-value), которые также нанесены на карты (рис. 3б, в и 4б, в).

Коэффициент вариации рассчитывался как отношение среднеквадратичного отклонения исследуемой дистанционно измеренной характеристики *V* к модулю математического ожидания:

$$Var = \frac{\sigma}{|\bar{V}|},$$

где \bar{V} — математическое ожидание характеристики *V*; σ — среднеквадратичное отклонение.

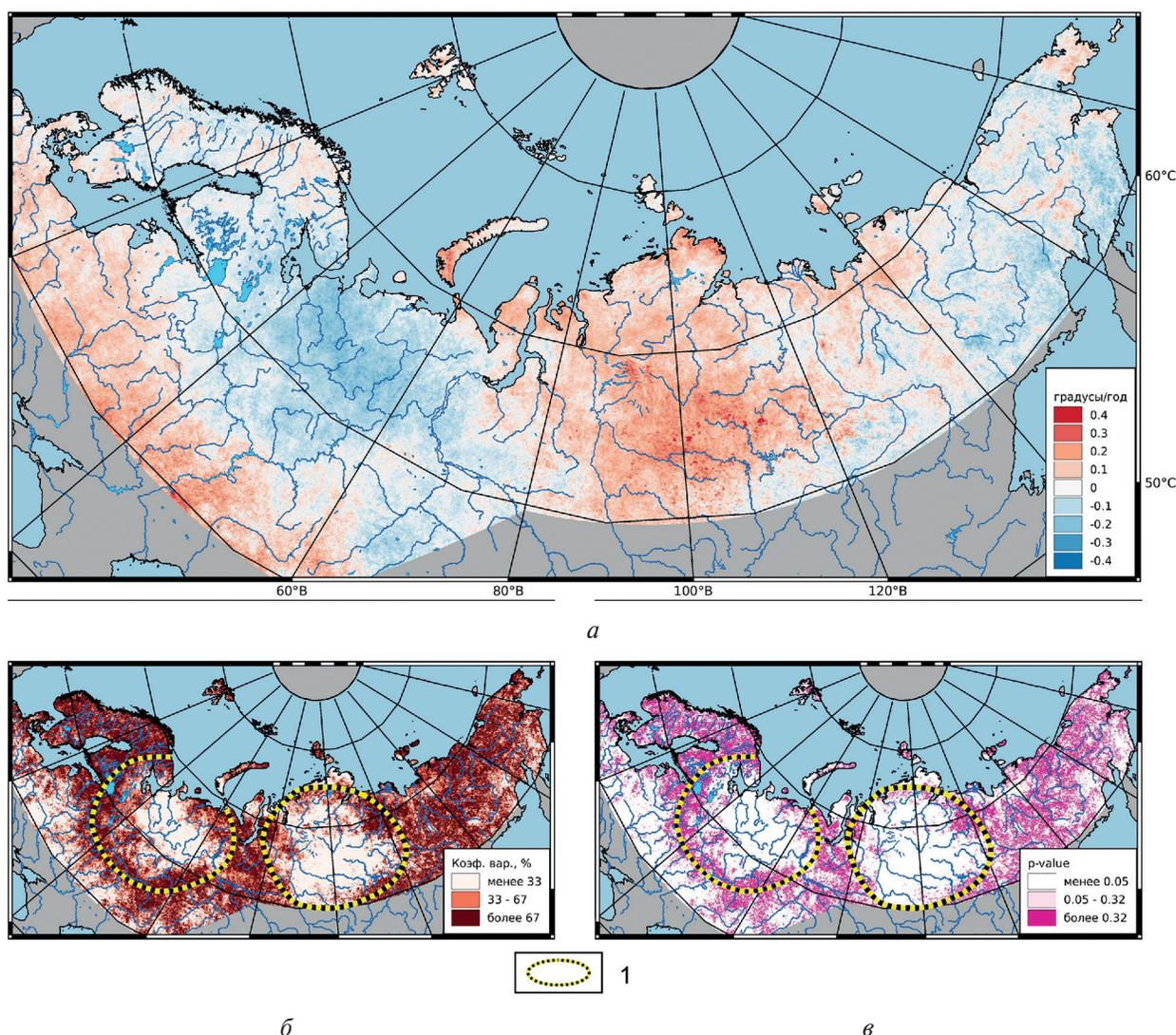


Рис. 3. Картограммы по результатам регрессионного анализа материалов съёмки спутниками Terra и Aqua за период с 2003 по 2020 г.: а — скорость изменения средней температуры ПП для самого тёплого месяца; б — коэффициент вариации; в — *p*-значение. 1 — границы областей достоверности картирования тренда

Аналогичный алгоритм применялся для анализа изменения вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). В качестве исходных данных использован продукт MOD13A3 (Didan, 2015) — среднемесячный вегетационный индекс с разрешением 1×1 км.

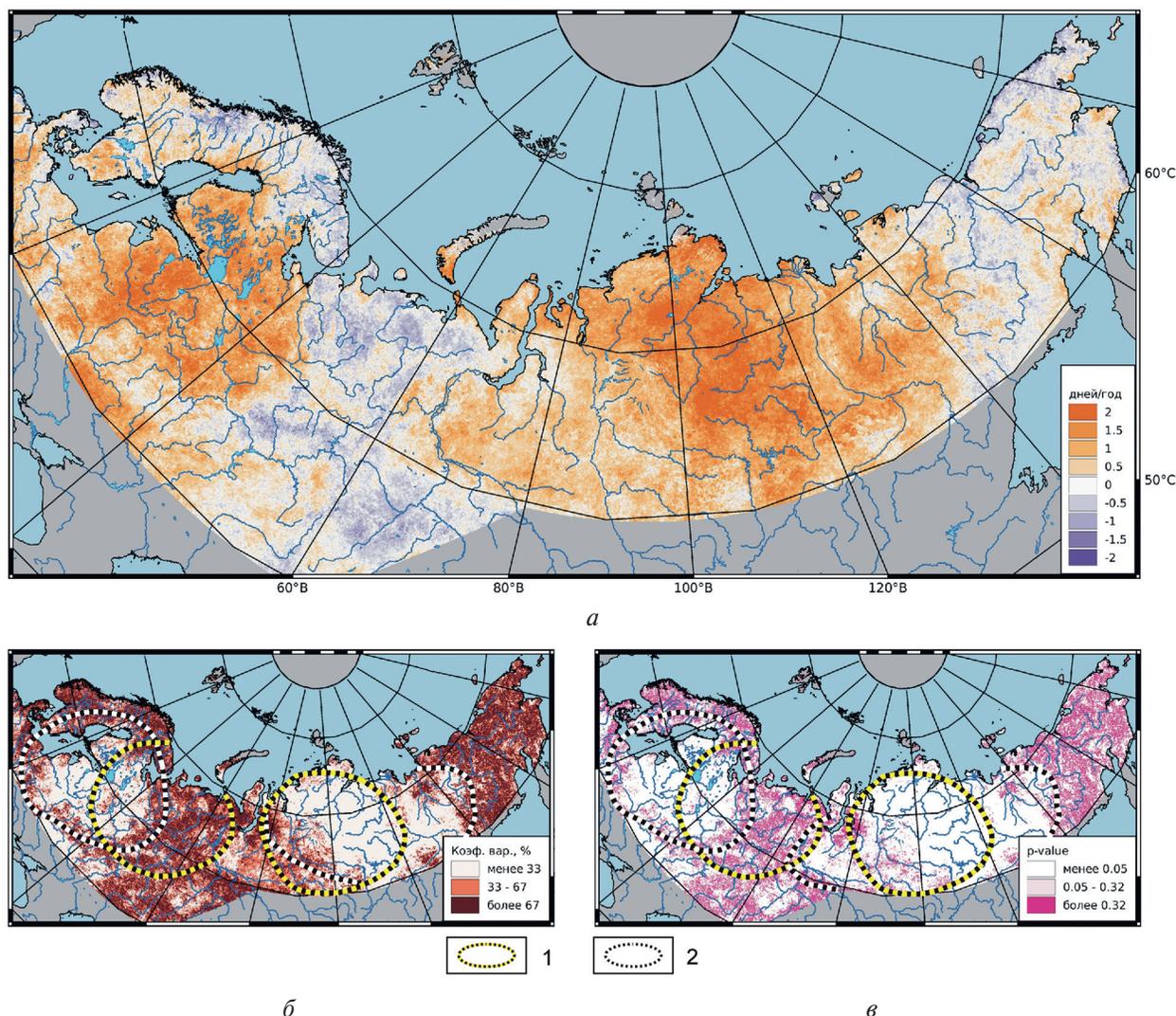


Рис. 4. Картограммы по результатам регрессионного анализа материалов съёмки спутниками Terra и Aqua за период с 2003 по 2020 г.: *а* — скорость изменения продолжительности вегетационного периода; *б* — коэффициент вариации; *в* — *p*-значение. 1 — границы областей достоверности определения тренда на рис. 3; 2 — границы областей достоверности определения тренда на рис. 4

Результаты

Основным результатом выступают цифровые карты трендов дистанционно измеренных характеристик Северной Евразии (см. рис. 3, 4).

Анализ картограммы скорости изменения средней температуры самого тёплого месяца (см. рис. 3), в отличие от выводов, полученных по данным наблюдений приземной температуры воздуха (Доклад..., 2020), показывает, что на территории Северной Евразии за период с 2003 по 2020 г. не наблюдалось монотонного повышения температуры ПП. На всей территории севера европейской части России отмечается снижение температуры ПП (см. рис. 3а). Но в западной части Европейской России достоверность тренда низка (см. рис. 3б, в). Поэтому нельзя говорить уверенно, что на этой территории наблюдаются существенные изменения среднемесячных температур. Вместе с тем в пределах северо-восточной части Европейской России достоверно закартировано охлаждение ПП со скоростью, достигающей $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (см. рис. 3а), при низкой вариабельности и малых *p*-значениях (см. рис. 3б, в).

Необходимо отметить, что на территории России коэффициент линейного тренда летней температуры приземного воздуха за период с 1976 по 2020 г., полученный по результатам наблюдений на метеостанциях, повсеместно положительный и составляет $0,039\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (рис. 1.6

в документе (Доклад..., 2020)), хотя в 2019 г. карта аномалий летней температуры приземного воздуха на территории России (отклонения от средних за 1961–1990 гг.) (рис. 1.2 в документе (Доклад..., 2020)) показывает обширную изометрическую отрицательную аномальную область на север-северо-востоке европейской части России, совпадающую в пространстве с полученной нами областью остывания температуры ПП (см. рис. 3). Необходимо отметить, что уже в 2020 г. по данным метеорологических наблюдений (рис. 1.2 в документе (Доклад..., 2020)) отрицательная аномалия температуры воздуха на северо-востоке Европейской России исчезла.

В противоположность к ситуации на территории Европейской России на северо-востоке Западной Сибири, в Восточной Сибири (Красноярский край, часть Республики Саха) за исследованный период надёжно выявлен нагрев ПП (см. рис. 3а) при низкой вариабельности и малых p -значениях (рис. 3б, в).

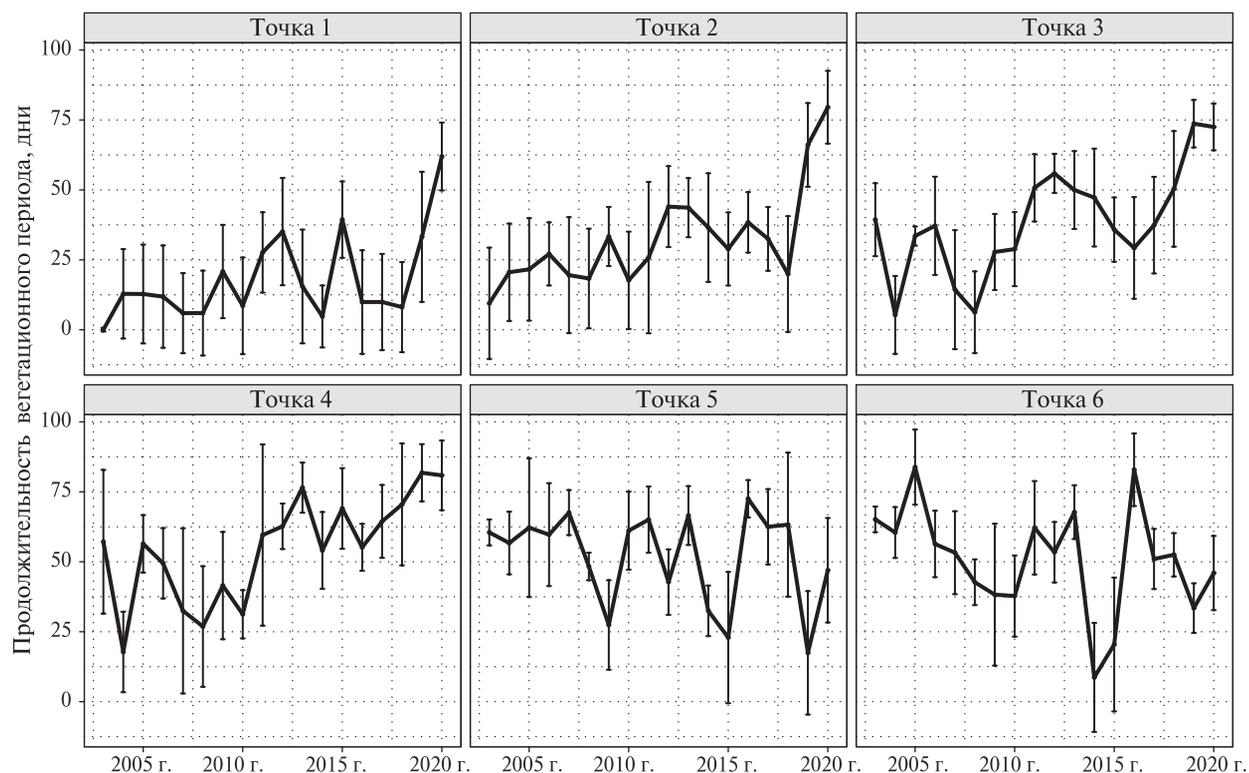


Рис. 5. Продолжительность вегетационного периода по годам. Номера точек на графиках соответствуют номерам площадок, показанным на рис. 4а

На цифровой картосхеме скорости изменения продолжительности вегетационного периода (см. рис. 4а) прослеживается несколько иная картина. Так, в пределах западной части Европейской России при низкой вариабельности и малых p -значениях (см. рис. 4б, в) надёжно выявлен рост продолжительности вегетационного периода (см. рис. 4а), так же как и на территории Сибири. При этом в Сибири площадь этой области роста продолжительности вегетационного периода (см. рис. 4а) превышает площадь области повышения температуры ПП самого тёплого месяца (см. рис. 3), что схематически показано на рис. 4в. В то же время в пределах северо-запада Европейской России, где в самые тёплые месяцы достоверно выявлено охлаждение ПП (см. рис. 3), падение продолжительности вегетационного периода достоверно не зарегистрировано из-за высоких пространственной вариабельности и p -значений (см. рис. 4б, в).

Построение графиков продолжительности вегетационного периода по годам позволило выявить специфическую особенность этой характеристики в Арктике. На самых северных территориях в последние годы наблюдалось резкое возрастание продолжительности вегета-

ционного периода (рис. 5, см. с. 160). Аномально — на 20–50 дней за три года — продолжительность вегетационного периода возросла на Таймыре (точки 1 и 2 на рис. 5 и 4). При этом продолжительность периода на юге Таймыра, когда температура приземного воздуха превышает $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляет 30 дней (Рудинский, 2015), а на севере полуострова в течение года набирается всего около 10 таких дней (<http://zapovedsever.ru/other/prirodno-klimaticheskie-usloviya-zapovednika-tajmyrskij>). Аномальный рост температуры за последние 3–4 года привёл к высоким значениям тренда продолжительности вегетационного периода за 17 лет, достигающим 2 дней/год (см. шкалу на рис. 4). В то же время на северо-востоке европейской части наблюдается слабое снижение продолжительности вегетационного периода при его значительных колебаниях год от года: от 10 до 75 дней (точки 5 и 6 на рис. 5 и 4), что лежит в пределах продолжительности вегетационного периода (температура воздуха более $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$), отмеченного по данным наблюдений на метеостанциях Ираёля (идентификатор 23514) и Петруни (идентификатор 23324) (Rikin et al., 2019).

Обсуждение результатов

Для дальнейшего углублённого изучения причин различия между результатами анализа метеорологических наблюдений за температурой приземного воздуха и температурой ПП может быть высказано несколько гипотез.

Продолжительность периода, для которого построена картосхема на рис. 3, составляет 31 день, т.е. в три раза меньше трёх месяцев лета, для которых строятся карты коэффициентов линейного тренда средних сезонных значений температуры приземного воздуха на территории России за период 1976–2019 гг. (Доклад..., 2020, 2021). В результате, если в целом за летний период температура монотонно возрастала, но при этом несколько снижалась средняя за самый тёплый месяц года температура ПП, т.е. если на графике (см. рис. 1) общий уровень летних температур поднялся, но стал менее выпуклым, то это могло привести к различиям в результатах спутникового мониторинга и данных климатологов. Это предположение не противоречит наблюдаемой в европейской части картине, где область отрицательного тренда среднемесячной температуры ПП в самый тёплый месяц занимает всю территорию (см. рис. 3а). Но в западной части Европейской России достоверность отрицательного тренда низка (см. рис. 3б, в), в отличие от север-северо-восточной территории (см. рис. 3б, в), где надёжно зарегистрирована обширная охлаждающаяся область (2 на рис. 4). В то же время на картосхеме тренда продолжительности вегетационного периода (см. рис. 4а) с высоким уровнем достоверности (см. рис. 4б, в) отмечена обширная изометрическая область на западе Европейской России. В противоположность этому на территории север-северо-востока Европейской России не выявлено достоверных изменений продолжительности вегетационного периода. В Сибири же отмечено совпадение положения на карте областей нагрева (1 на рис. 3 и 2 на рис. 4) продолжительности вегетационного периода (см. рис. 4), хотя и площадь области положительного тренда продолжительности вегетационного периода несколько увеличивается в размерах (см. 1 и 2 на рис. 4). Отмеченные в европейской части и в Сибири различия требуют дальнейшего осмысления и анализа причин, их вызвавших.

Необходимо отметить, что значительно различаются многолетние интервалы времени, для которых построены тренды температуры: 43 года — для тренда температуры приземного воздуха и 17 лет — для тренда температуры ПП, что составляет только несколько более трети срока метеорологических наблюдений, с которым проводится сравнение. Тем не менее начало временного интервала для расчёта трендов температуры приземного воздуха Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) выбрано неслучайно, так как с 1976 г. началось надёжно регистрируемое на метеостанциях повышение температуры воздуха (рис. 1.1 в документе (Доклад..., 2020)). Главное, что и на интервале 2002–2020 гг., для которого построены тренды температуры ПП, эта тенденция изменения температуры приземного воздуха сохранялась. Это и позволяет выполнять сравнение результатов двух технологий многолетнего мониторинга.

Результаты, приведённые в документах (Второй..., 2014; Доклад..., 2020, 2021), основаны на точечных наблюдениях за температурой воздуха на стандартных метеостанциях, располагаемых на покрытых травой открытых (незатенённых) площадках. Спутник же регистрирует инфракрасное-тепловое излучение ПП с участка площадью $\sim 1 \text{ км}^2$. Большая часть исследуемой территории покрыта лесными экосистемами, теплообмен которых с атмосферой отличается от такового у травяного покрова. Известно, что температура поверхности лесных экосистем ниже по сравнению с вырубками (Краснощеков и др., 2019). Это вызвано тем, что за счёт значительно большей испаряющей площади листьев эвапотранспирация с поверхности лесных экосистем выше, чем у степных. Кроме того, для большинства растений средней полосы оптимальным для фотосинтеза диапазоном температуры считается $+20...+25 \text{ }^\circ\text{C}$. Соответственно, должен существовать физиологический механизм, понижающий температуру листьев при нагреве выше верхнего предела этого диапазона. Этот механизм обеспечивает транспирация влаги с поверхности листьев. Повышение температуры воздуха вызывает рост транспирации с поверхности листьев и снижение темпа их нагрева (Encyclopedia..., 2008). Возможно, что именно благодаря этому механизму и сформировалась обширная область охлаждения ПП на северо-востоке Европейской России (см. рис. 3). Тем более, что, по данным климатологов, на большей части исследованной территории количество осадков за период с 1936 по 2010 г. возросло (рис. ОР1.5 в докладе (Второй..., 2014)). При многолетнем приросте осадков лесные экосистемы должны охлаждаться с большей скоростью, чем травяной покров. Таким образом, одной из возможных гипотез формирования на северо-западе Европейской России обширной области охлаждения ПП может быть реакция лесных экосистем на повышение температуры воздуха и рост количества осадков. Следует отметить, что такой эффект труднее заметить, если рассматривать только динамику температуры приземного воздуха по данным наблюдений на метеостанциях. Такая реакция экосистем может рассматриваться как обратная связь, которую необходимо учитывать при прогнозировании глобального потепления. Поэтому в дальнейшем целесообразно выполнить проверку этой гипотезы.

На всей территории Северной Евразии не наблюдается тотального нагрева ПП. Более того, отмечается последовательная регулярная смена областей нагрева и остывания поверхности. То есть выявлены качественные различия между результатами, полученными на основании многолетних наблюдений температуры приземного воздуха и по данным спутникового мониторинга. Одной из причин, вызывающий подобный эффект, может быть активизация процессов общей циркуляции атмосферы в пределах ячейки Ферреля, расположенной между 30 и 65° с. ш., северной части которой соответствует закартированная территория. В этом случае в выявленных областях нагрева должны активизироваться восходящие воздушные потоки, а в областях остывания — нисходящие.

Заключение

Настоящее исследование показало, что летом на большей части Северной Евразии отмечены качественные различия между скоростями изменения температуры ПП (по данным спутникового мониторинга) и воздуха (на основе метеонаблюдений). Результаты работы не дают оснований для однозначных выводов о причинах этих расхождений. Выдвинуто лишь несколько гипотез, и требуются дальнейшие исследования для их проверки. Тем не менее поставленная академиком К. Я. Кондратьевым проблема верификации результатов прогнозирования глобального потепления остаётся актуальной, что, безусловно, определяет необходимость продолжения исследований в этом направлении.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А19-119020190122-6) и участия Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН в международной программе Pan-Eurasian Experiment (PEEX).

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
2. Демирчян К. С., Кондратьев К. Я., Демирчян К. К. Глобальное потепление и «Политика» его предотвращения // Биосфера. 2010. Т. 2. № 4. С. 488–502.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97 с.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
5. Кондратьев К. Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 93–119.
6. Краснощеков К. В., Дергунов А. В., Пономарев Е. И. Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 87–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
7. Рудинский М. Г. Возобновление лиственницы на северном пределе распространения (массив Ары-Мас, п-ов Таймыр) // Науч. обозрение. Биолог. науки. 2015. № 1. С. 135–135.
8. Didan K. MOD13A3 v006: MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1 km SIN Grid / NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006>.
9. Encyclopedia of ecology / eds. Jørgensen S. E., Fath B. D. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008. 3120 p.
10. Rykin I., Shagnieva A., Panidi E., Tsepelev V. Highly discrete mapping of the growing season time frames and dynamics // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. GeoInformation for Disaster Management. Gi4DM 2019. 3–6 Sept. 2019, Prague, Czech Republic. 2019. V. XLII-3/W8. P. 357–361. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-357-2019>.
11. Xiong X., Chiang K., Wu A., Barnes W., Bruce G., Salomonson V. Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Thermal Emissive Bands // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46(6). P. 1790–1803. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916217.

Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change

V. I. Gornyy, A. V. Kiselev, S. G. Kritsuk, I. Sh. Latypov, A. A. Tronin

*Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

The paper analyzes features of the spatio-temporal dynamics of remotely measured land surface temperature (LST) of ecosystems in Northern Eurasia as a response to climate change and anthropogenic impact. The map of LST rate of change and the growing season duration trend maps were built using the per-pixel regression analysis. The algorithm was applied to Terra and Aqua satellites (MODIS instrument) data for the time period from 2002 to 2020. Results include: maps of annual average temperature of the growing season, maps of the warmest months temperature trend and maps of the growing season length trend. It was found that there is no general trend towards an increase in the surface temperature of ecosystems of Northern Eurasia. A regular system of large areas of heating and cooling of the land surface was revealed instead. The result obtained contradicts the existing conclusions of climatologists based on the results of long-term observations of air temperature at weather stations. The proposed explanation of the revealed contradiction is a hypothesis of activation of the general atmospheric circulation in the Ferrel cell is proposed.

Keywords: Northern Eurasia, atmosphere, ecosystems, satellite, temperature, mapping, multiyear trends, global warming

Accepted: 29.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164

References

1. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p. (in Russian).
2. Demirchyan K. S., Kondratyev K. Ya., Demirchyan K. K., Global Warming and the “Policy” of its Prevention, *Biosfera*, 2010, Vol. 2, No. 4, pp. 488–502 (in Russian).
3. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2019 god* (A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2019), Moscow: Rosgidromet, 2020, 97 p. (in Russian).
4. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* (A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2020), Moscow: Rosgidromet, 2021, 104 p. (in Russian).
5. Kondrat'ev K. Ya., Uncertainties of Observation and Numerical Climate Simulation, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, No. 4, pp. 93–119 (in Russian).
6. Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Ponomarev E. I., Evaluation of Underlying Surface Temperature Maps on Logging Sites Using Landsat Data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 87–97 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
7. Rudinsky M. G., Reforestation of the larch at the northern limit of distribution in Ary-Mas forest island, Taimyr Peninsula, *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 2015, No. 1, pp. 135–135 (in Russian).
8. Didan K., *MOD13A3 v006. MODIS/Terra vegetation Indices Monthly L3 Global 1 km SIN Grid*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006>.
9. *Encyclopedia of ecology*, Jørgensen S. E., Fath B. D. (eds.), Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008, 3120 p.
10. Rykin I., Shagnieva A., Panidi E., Tsepelev V., Highly discrete mapping of the growing season time frames and dynamics, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, GeoInformation for Disaster Management, Gi4DM 2019*, 3–6 Sept. 2019, Prague, Czech Republic, 2019, Vol. XLII-3/W8, pp. 357–361, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-357-2019>.
11. Xiong X., Chiang K., Wu A., Barnes W., Bruce G., Salomonson V., Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Thermal Emissive Bands, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46(6), pp. 1790–1803, DOI: 10.1109/TGRS.2008.916217.