

Особенности пространственно-временной динамики растительного покрова Сибири в условиях арктического усиления потепления климата

Е. В. Варламова, В. С. Соловьев

*Институт космофизических исследований и аэронавтики
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677027, Россия
E-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru*

Быстрое потепление Арктики (арктическое усиление) оказывает существенное воздействие на северные экосистемы, в том числе на растительный покров, который является ключевым участником углеродного цикла, регулирующим концентрацию CO_2 в атмосфере. По вегетационному индексу NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) набора данных GIMMS-3G+ (*англ.* Global Inventory Modeling and Mapping Studies-3rd Generation V1.2) за период 1982–2022 гг. проведено исследование пространственно-временных изменений растительности Сибири в условиях арктического усиления. Показано, что на территории Сибири в среднем преобладает положительный ($3 \pm 1\%$) тренд интегрального NDVI TIN (*англ.* Time Integrated NDVI) на фоне роста среднегодовой температуры воздуха на $2,1 \pm 0,8^\circ\text{C}$. На севере выявлена область с наиболее высоким статистически значимым ростом TIN на $10 \pm 2\%$, на локальных участках которого максимальный рост достигает $\sim 22\%$. При этом в 2004–2012 гг. наблюдается наиболее длительный устойчивый рост TIN ($7 \pm 1\%$) и соответствующий сдвиг начала сезона вегетации SOS (*англ.* Start Of the growing Season) на более ранние сроки (16 ± 4 дня), а в течение 2012–2017 гг. отмечен быстрый спад TIN на $7 \pm 1\%$ со сдвигом SOS на более поздние сроки (24 ± 3 дня). Наблюдаемые изменения показателей растительности обусловлены в основном температурным фактором. Устойчивый рост TIN на $7 \pm 1\%$ в 2004–2012 гг. связан с повышением приземной температуры воздуха на $2,2 \pm 0,8^\circ\text{C}$, увеличением тёплого периода на 50 ± 11 дней и количества ясных дней на 30 ± 3 дня. Быстрый спад TIN в 2012–2017 гг. происходил на фоне снижения температуры на $3,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$, уменьшения тёплого периода на 16 ± 13 дней и количества ясных дней на 24 ± 3 дня.

Ключевые слова: растительный покров, дата начала сезона вегетации, арктическое усиление, Сибирь, NDVI, GIMMS

Одобрена к печати: 01.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-234-249

Введение

Одна из наиболее важных экологических проблем современности — глобальное потепление климата, вызванное изменением радиационного баланса Земли вследствие воздействия антропогенных и природных факторов. Известно, что картина потепления в масштабах планеты неоднородна, наибольший рост температуры наблюдается на высоких широтах (Serreze et al., 2009). Как показывают наблюдения (England et al., 2021; Rantanen et al., 2022), темпы роста температуры воздуха в Арктике за последние несколько десятилетий в 3–4 раза выше, чем на остальной части планеты — это явление получило название «арктическое усиление» (АУ). Арктическое усиление оказывает существенное воздействие на северные экосистемы, в том числе на растительный покров, который является ключевым участником углеродного цикла, регулирующим концентрацию CO_2 в атмосфере.

Для понимания влияния эффектов АУ на растительность Сибири требуется всесторонний анализ пространственно-временной динамики растительного покрова по данным комплексных долговременных наблюдений. Наиболее подходящими для решения этих задач представляются данные дистанционного зондирования, обеспечивающие необходимую периодичность, пространственный охват, разрешение и долговременность наблюдений, а также данные сети наземных наблюдений. К наиболее непрерывным и продолжительным по временному охвату (начало 1980-х — начало 2020-х гг.) относятся данные многоканального

радиометра AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer). По измерениям в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне строятся спектральные образы растительного покрова — вегетационные индексы, отражающие информацию о состоянии растительности (Bannari et al., 1995; Rouse et al., 1974). Хорошо зарекомендовавшим и широко используемым на практике вегетационным индексом выступает индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Goward et al., 1991; Rouse et al., 1974).

Исследования (Bhatt et al., 2021; Huang et al., 2024; Zhang et al., 2025), основанные на спутниковых наблюдениях за динамикой состояния растительного покрова и фенологических сроков в условиях изменяющегося климата, общий охват которых приходится на период с начала 1980-х гг. по настоящее время, проведены в основном с использованием NDVI в различных пространственных масштабах (локальном, региональном, циркумполярном и глобальном). Обобщённый результат исследований сводится к тому, что растительность в целом остро реагирует на глобальное изменение климата — варьируют фенологические сроки, изменяется продолжительность вегетационного сезона, меняются показатели биомассы, изменяются границы ареала распространения и типы растительности и др.

Результаты исследований (Ji et al., 2025; Kirdyanov et al., 2024; Li et al., 2023; Liu et al., 2025; Wei et al., 2023; Zuev et al., 2020) по динамике показателей растительного покрова на фоне АУ в высоких широтах Евразии в целом демонстрируют положительную тенденцию состояния бореальных лесов и тундровой растительности. Ключевым фактором, влияющим на изменение показателей растительного покрова в этом регионе, является в основном приземная температура воздуха. Величина тенденций состояния растительности и сдвига фенологических сроков значительно различается в зависимости от периода исследования, рассматриваемого пространственного масштаба и метода (используемого вегетационного индекса, периода сезона вегетации и др.). Так, например, в работе (Zuev et al., 2020) показано, что в западной Сибири за 1982–2015 гг. наблюдается тенденция увеличения NDVI растительного покрова таёжной и тундровой зоны, обусловленная ростом приземной температуры воздуха в весенне-летние месяцы (май — июнь). Авторы отмечают, что сезонное развитие растительности в таёжной и тундровой зоне Западной Сибири в значительной степени определяется её развитием в первый месяц тёплого периода года: в таёжной зоне — в мае, в тундровой — в июне. За аналогичный период (1982–2016) в работе (Wei et al., 2023) проведено исследование влияния экстремальных климатических условий на растительность в средних и высоких широтах Азии. Авторы установили, что в высокоширотной области Азии (на территории Сибири) в течение вегетационного периода для бореальных лесов были благоприятны сухие и/или жаркие условия. Было выдвинуто предположение, что экстремально тёплые условия способствуют росту леса в этом регионе. Изменения фенологических сроков для бореальных лесов в переходной зоне тундры и тайги в Восточной Сибири за 2000–2017 гг. были показаны в работе (Li et al., 2023), где выявлена тесная связь между сроками начала/окончания сезона вегетации и приземной температурой воздуха. В работе было показано, что на исследуемой территории наблюдается тенденция более раннего начала сезона вегетации на 10–25 дней. При этом максимальный сдвиг (на 20–25 дней) сроков начала сезона вегетации наблюдался в центральной части (65–68° с. ш.) исследуемой территории и был обусловлен значительным ростом температуры в апреле, мае и июне. Также было показано, что в южной части (к югу от 67° с. ш.) исследуемой территории наблюдалась тенденция более позднего окончания сезона вегетации на 5–25 дней, обусловленная повышением температуры в августе, сентябре и октябре. Авторы отмечают, что сроки окончания сезона вегетации были более чувствительны к изменениям температуры, чем сроки начала.

Не смотря на общую тенденцию роста показателей растительности во всей циркумполярной Арктике (Heijmans et al., 2022; Mekonnen et al., 2021), некоторые исследования в арктической тундре выявили снижение летних значений NDVI. Так, например, в работе (Magnússon et al., 2023) изучение динамики состояния тундровой растительности в Индигирской низменности на северо-востоке Сибири показало тенденцию снижения максимальных летних значений NDVI, обусловленную в значительной степени динамикой влажности почвы вследствие летней засухи и экстремальных летних снегопадов. Результаты полевых исследований

в работе (Huemmrich et al., 2023) также показывают тенденцию снижения летнего максимума NDVI арктической тундры на Аляске, связанную с микротопографическими и гидрологическими эффектами. Авторы отмечают, что полевые изыскания на локальном уровне дают ценную основу для интерпретации результатов многолетних спутниковых наблюдений.

Таким образом, реакция растительного покрова на АУ на высоких северных широтах пространственно неоднородна и недостаточно изучена. Продолжение работ по исследованию долговременной динамики показателей растительного покрова высокоширотных регионов дополнит результаты ранее проведённых работ и углубит понимание отклика показателей растительности на АУ потепления климата. Цель настоящей работы — изучение особенностей пространственно-временной динамики показателей растительного покрова Сибири в условиях арктического усиления по многолетним данным дистанционного зондирования и сети наземных наблюдений (1982–2022).

Данные и методы

Данные дистанционного зондирования

В настоящей работе в качестве показателя состояния растительного покрова выбран хорошо зарекомендовавший и широко используемый на практике нормализованный разностный индекс вегетации NDVI (Goward et al., 1991; Rouse et al., 1974). Из свободно распространяемых данных, содержащих временные ряды NDVI, выбран наиболее непрерывный и продолжительный по временному охвату набор данных GIMMS-3G+ (*англ.* Global Inventory Modeling and Mapping Studies-3rd Generation V1.2) (Pinzon et al., 2023), созданный на основе данных многоканальных радиометров AVHRR, установленных на спутниках NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) и MetOp (*англ.* Meteorological Operational satellite). Набор содержит 15-дневные максимальные композиты NDVI, имеет глобальный охват с пространственным разрешением $0,08 \times 0,08^\circ$ (широта/долгота) и временным периодом 1982–2022 гг. Данные распространяются ORNL DAAC (*англ.* Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center) (<https://daac.ornl.gov/>).

Данные реанализа

Для анализа влияния метеорологических параметров (приземной температуры воздуха, атмосферных осадков, облачного покрова) на показатели состояния растительного покрова в работе использован глобальный набор данных атмосферного реанализа пятого поколения ERA5 (*англ.* European Reanalysis v5) (Hersbach et al., 2020), разработанный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>). Данные ERA5 имеют глобальный охват с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ и временным интервалом 1979–2025 гг.

Для сопоставления и анализа результатов данные дистанционного зондирования и реанализа были приведены к единому пространственному разрешению $0,5 \times 0,5^\circ$. Данные реанализа по приземной температуре воздуха, усреднённые за периоды май–сентябрь (далее $T_{\text{м-с}}$) и май–июнь (далее $T_{\text{м-и}}$), а также атмосферные осадки за период май–сентябрь (далее $AO_{\text{м-с}}$) были сопоставлены с аналогичными данными метеостанций (соответственно $T_{\text{м-с}}^*$, $T_{\text{м-и}}^*$ и $AO_{\text{м-с}}^*$).

Данные метеостанций

В работе были использованы данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам 12 метеостанций Росгидромета (Саскылах, Тикси, Джалинда, Кюсюр, Юбилейная, Оленёк,

Сухана, Джарджан, Верхоянск, Шелагонцы, Жиганск, Усть-Чаркы), расположенных на севере Якутии. Данные получены из баз данных (Булыгина и др., 2014, 2015), распространяемых Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации — Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД) (<http://meteo.ru/data/>).

Метод расчёта интегрального вегетационного индекса TIN

Интегральный NDVI TIN (*англ.* Time Integrated NDVI) достоверней отражает первичную продуктивность экосистемы (Wang et al., 2005) и сезонную биомассу растительности (Rigge et al., 2013), чем усреднённый NDVI за вегетационный период. Эффективность TIN как показателя сезонного состояния растительности заключается в учёте продолжительности вегетационного периода и суммарной величины NDVI за этот период. Существуют разные подходы (Potter, Alexander, 2020; Wang et al., 2005) установления временного интервала для интегрирования NDVI в зависимости от целей исследования.

В настоящей работе TIN рассчитывался как сумма 15-дневных значений NDVI за период май — сентябрь, соответствующий средней продолжительности бесснежного периода в Сибири. Таким образом, на основе временных рядов NDVI данных GIMMS-3G+ (1982–2022) на территории Сибири были построены ежегодные карты распределения TIN.

Метод расчёта даты начала вегетационного сезона

Для определения фенологических сроков растительного покрова по данным спутниковых наблюдений широко используется вегетационный индекс NDVI (Zeng et al., 2020). Большинство методов определения фенологических сроков основаны на пороговых алгоритмах, когда за даты начала и окончания вегетационного сезона устанавливается день года, при котором достигается заданное значение вегетационного индекса (Li et al., 2017; White et al., 2009). Однако существующие алгоритмы определения фенологических сроков в большинстве случаев не обладают необходимой универсальностью, поскольку значения их пороговых критериев во многом зависят от типов растительности и климатогеографических условий их произрастания. В работе (White et al., 2009) предложен метод Midpoint, основанный на локально настроенном пороговом значении, согласно которому дата начала вегетационного сезона наступает в день года, когда значение NDVI (предварительно преобразованное в диапазон от 0 до 1 методом $NDVI_{ratio}$) весной превышает пороговое значение 0,5. В публикации (White et al., 1997) сообщается, что метод $NDVI_{ratio}$ нивелирует различия между почвенно-растительными покровами и тем самым устраняет необходимость установления индивидуальных порогов в зависимости от типа растительного покрова. Авторы работы (White et al., 2009) отмечают, что спутниковые методы по определению даты начала вегетационного сезона были наиболее достоверными на северных широтах, чем в засушливых, тропических и средиземноморских экорегионах.

Таким образом, в настоящей работе даты начала вегетационного сезона SOS (*англ.* Start Of the growing Season) на территории Сибири рассчитывались на основе порогового метода Midpoint по данным GIMMS-3G+. Дискретные данные NDVI предварительно сглаживались методом Савицкого — Голея (Savitzky, Golay, 1964), затем даты SOS рассчитывались с помощью программы TIMESAT (Eklundh, Jönsson, 2015).

Метод расчёта продолжительности тёплого периода

На основе реанализа ERA5 по данным приземной температуры воздуха на территории Сибири была построена (1982–2022) карта тренда продолжительности тёплого периода (далее ТП10), в течение которого среднесуточная температура воздуха была выше +10 °C. При этом даты начала и окончания тёплого периода определялись как день года, когда

наблюдался устойчивый (в течение пяти дней подряд) переход среднесуточной температуры воздуха через $+10^{\circ}\text{C}$ весной и осенью.

Метод расчёта количества облачных дней

Также на основе реанализа ERA5 по данным облачного покрова (далее ОП) на территории Сибири была построена (1982–2022) карта тренда количества дней с облачностью за период май–сентябрь. При этом облачным днём считался день, когда доля облачного покрова в ячейке ($0,5 \times 0,5^{\circ}$) градусной сетки превышала 70 %.

Расчёт трендов

Тренды рассматриваемых параметров рассчитывались с использованием метода оценочной функции Тейла–Сена (Sen, 1968). Статистическая значимость трендов оценивалась с помощью критерия значимости Манна–Кендалла (Mann, 1945) на уровне 95 % ($p < 0,05$).

Область исследования

Климат в западной части Сибири континентальный и резко континентальный в восточной, с относительно тёплым коротким летом и продолжительной и суровой зимой. Многолетнее внутригодовое колебание температуры воздуха от зимы к лету в некоторых районах Сибири достигает 100°C . Осадков в Сибири в целом мало, особенно в северо-восточной части, расположенной в зоне сплошной мерзлоты, где годовое количество осадков колеблется от 150 до 300 мм. Районы с наибольшим количеством осадков находятся в западной части Сибири, где большая часть осадков приносится воздушными массами с запада и северо-запада. Суровые климатические условия Сибири обусловили широкое распространение хвойных листопадных лесов, отличающихся высокой морозостойкостью. Карта земного покрова Сибири, полученная на основе данных проекта GLC2000 (*англ.* Global Land Cover mapping for the year 2000) (Bartalev et al., 2003), показана на *рис. 1* (см. с. 239). Доминирующими видами хвойных листопадных лесов являются лиственничные таёжные леса и редколесья (лиственница сибирская, даурская и каяндера). На северной окраине вдоль западной и восточной части Сибири простирается тундровая растительность (арктическая, мохово-лишайниковая и кустарниковая). В южной части Сибири, за исключением сельскохозяйственных земель, растительный покров в основном состоит из вечнозелёных хвойных, смешанных и листопадных широколиственных лесов.

Таблица 1. Названия классов земного покрова

Класс	Название класса
1	Лиственные леса
2	Хвойные вечнозелёные леса
3	Хвойные листопадные леса
4	Смешанные леса
5	Леса в комплексе с другой естественной растительностью
6	Свежие лесные гари
7	Хвойные вечнозелёные кустарники
8	Лиственные кустарники
9	Травянистая растительность
10	Тундра

Окончание табл. 1

Класс	Название класса
11	Водно-болотные комплексы
12	Сельскохозяйственные земли
13	Леса в комплексе с сельскохозяйственными землями
14	Сельскохозяйственные земли в комплексе с лугами
15	Пустыня и гольцы
16	Реки и внутренние водоёмы
17	Вечные снега и льды
18	Урбанизированные территории

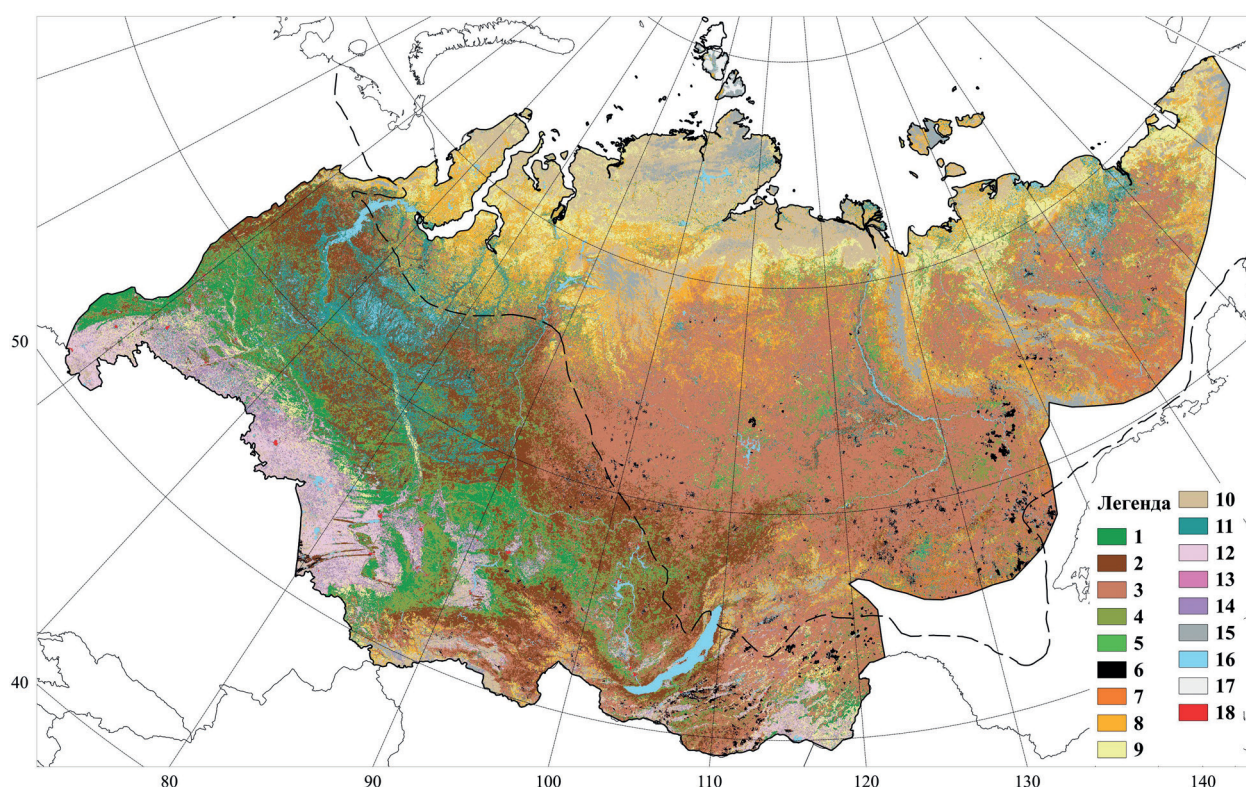


Рис. 1. Карта земного покрова Сибири (исследуемая территория). Названия классов земного покрова в соответствии с легендой рисунка представлены в табл. 1. Штриховой линией условно обозначена граница зоны сплошной вечной мерзлоты

Результаты и обсуждение

Среднегодовое (1982–2022) пространственное распределение значений TIN на территории Сибири показано на рис. 2а (см. с. 240). Распределение TIN имеет ярко выраженную широтную зависимость с некоторыми неоднородностями, обусловленными орографическими особенностями местности, и хорошо согласуется с климатическими условиями и типами растительности Сибири. В зоне лесотундры, тундры и в высокогорных местностях, где растительный покров представлен в основном редколесьями, кустарниками и травами, значения $TIN < 5$. Высокие (от 6 до 8) значения TIN наблюдаются в бореальной лесной зоне Сибири с наиболее благоприятным климатом и более длительным вегетационным периодом.

Как было показано ранее (Варламова, Соловьев, 2024), на территории Сибири в 1982–2022 гг. наблюдался рост среднегодовой приземной температуры воздуха (в среднем на

$2,1 \pm 0,8$ °C) с заметным эффектом арктического усиления — в среднем в Заполярье тренд температуры составил $+3,3 \pm 0,8$ °C, а южнее Северного полярного круга — $+1,6 \pm 0,8$ °C. Как следует из рис. 2б, в условиях АУ на 77 % территории Сибири преобладает положительный тренд TIN, из которых на 48 % тренды статистически значимы ($p < 0,05$). При этом отрицательные тренды TIN занимают всего 23 %, из которых только 6 % статистически значимые. Таким образом, за весь исследуемый период в среднем по Сибири наблюдается прирост значений TIN на 3 ± 1 %. В картине распределения тренда TIN (см. рис. 2б) на севере Якутии выше 65-й параллели в зоне лесотундры и тундры выявлена обширная область с наиболее высокими ($>0,15$ %/год) статистически значимыми трендами TIN. Для более детального анализа изменений характеристик растительного покрова в указанной области был выбран участок — область исследования (далее ОИ), показанный на рис. 2б в виде сектора, ограниченного чёрной линией. Средний прирост TIN за 1982–2022 гг. в ОИ составил 10 ± 2 %, а на отдельных участках ОИ прирост достиг ~ 22 %.

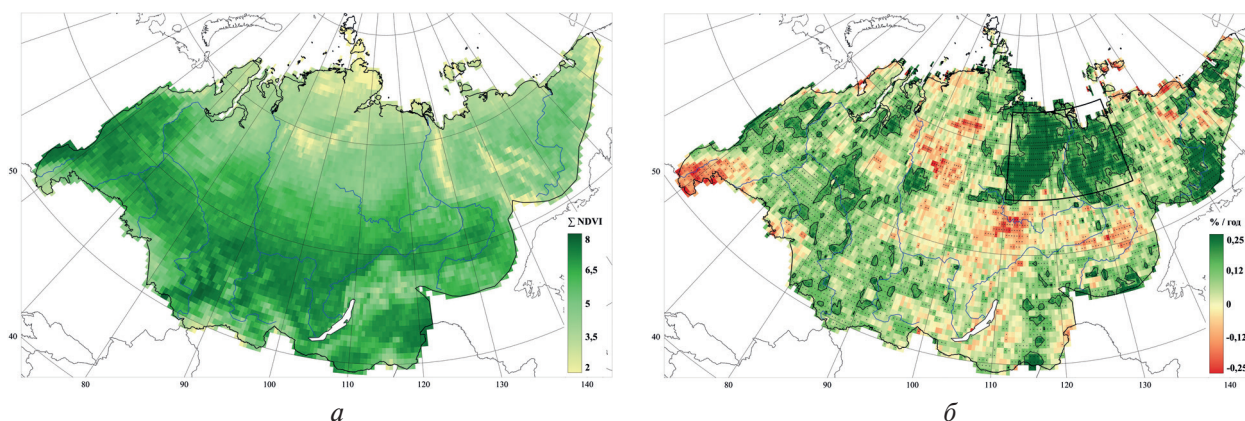


Рис. 2. Пространственное распределение среднегогодового значения (а) и линейного тренда (б) TIN на территории Сибири за 1982–2022 гг. Точками отмечены статистически значимые тренды ($p < 0,05$). Чёрной линией на северо-востоке Сибири выделен обособленный участок (ОИ) с наиболее высокими темпами роста TIN

Доминирующий тип растительности в ОИ — лиственные леса и редколесье, а в северной части ОИ — тундровая растительность. Начало и окончание вегетационного периода растительности средних и высоких широт Северного полушария связывают в основном с переходом среднесуточной температуры воздуха весной и осенью в диапазоне от $+5$ до $+10$ °C (Карбасникова и др., 2020; Суворова, Попова, 2015; Barichivich et al., 2012).

Карты трендов ТП10 и приземной температуры воздуха за май–сентябрь $T_{м-с}$ показаны на рис. 3а, б (см. с. 241). Цветовой градацией отображены значения трендов, чёрными точками отмечены статистически значимые показатели трендов ($p < 0,05$). Как следует из рис. 3а, на территории Сибири преобладает положительная тенденция ТП10. В среднем по Сибири рост ТП10 составил 14 ± 5 дней. При этом наиболее высокие и статистически значимые положительные тренды ТП10 выявлены на северо-востоке Сибири. В среднем на территории ОИ за 1982–2022 гг. ТП10 увеличился на 36 ± 11 дней за счёт тенденции более раннего начала (на 22 ± 8 дней) и позднего окончания (на 14 ± 10 дней) ТП10. Тренд $T_{м-с}$ (см. рис. 3б) также демонстрирует положительную тенденцию с заметным увеличением тренда с юга на север. В среднем по Сибири за исследуемый период наблюдается рост $T_{м-с}$ на $2,0 \pm 0,5$ °C, а в ОИ — на $3,1 \pm 1$ °C. Таким образом, наиболее сильное изменение температурных условий отмечается на севере Сибири преимущественно в ОИ, причём максимальные значения роста $T_{м-с}$ и ТП10 на отдельных участках ОИ достигают ~ 4 °C и ~ 60 дней соответственно.

В то же время на территории Сибири в целом за период май–сентябрь 1982–2022 гг. наблюдается (рис. 4а, см. с. 241) сокращение количества дней с ОП. В среднем по Сибири тренд ОП составил $-(6 \pm 3)$ дня. В ОИ отмечается незначительное снижение ОП. Сокращение

ОП на ~15–25 дней наблюдается в основном на юге Сибири (~50–55° с. ш.), где также фиксируется уменьшение атмосферных осадков за период май – сентябрь AO_{M-C} на ~100–150 мм (см. *рис. 4б*). В ОИ тренд AO_{M-C} не отмечен.

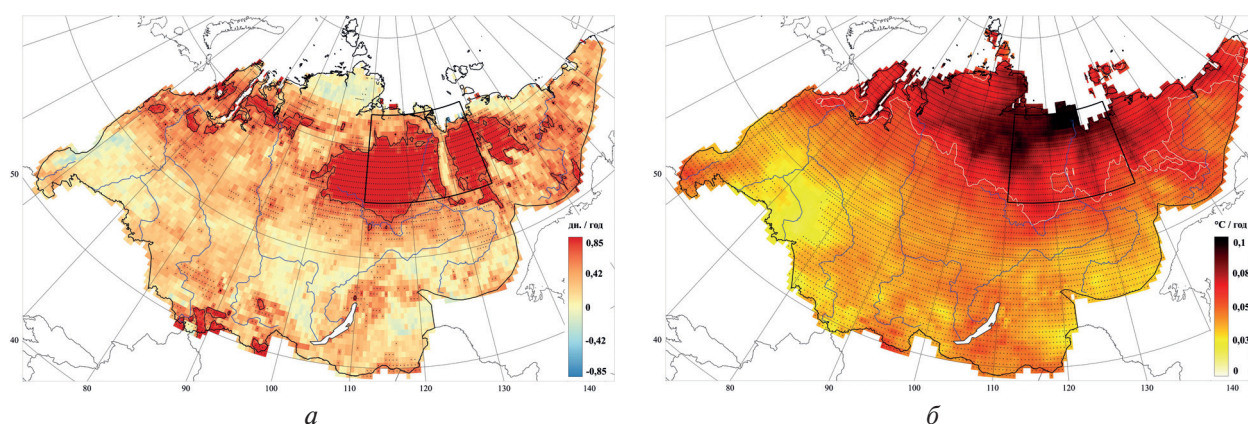


Рис. 3. Тренды ТП10 (а) и приземной T_{M-C} (б) на территории Сибири за 1982–2022 гг. Точками отмечены статистически значимые тренды ($p < 0,05$). Чёрной линией выделена ОИ

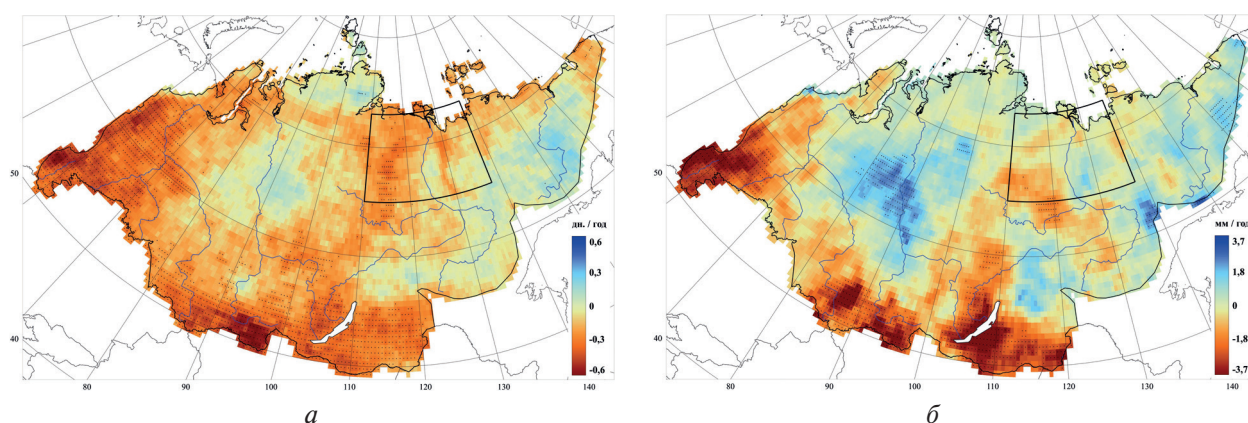


Рис. 4. Тренды ОП (а) и AO_{M-C} (б) на территории Сибири за 1982–2022 гг. Точками отмечены статистически значимые тренды ($p < 0,05$), чёрной линией выделена ОИ

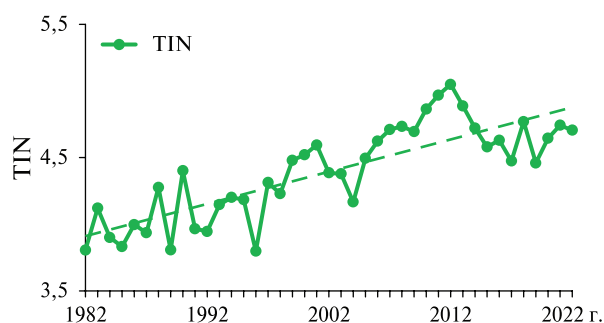


Рис. 5. Вариации TIN в ОИ за исследуемый период

График изменения TIN на территории ОИ за 1982–2022 гг. показан на *рис. 5*. В целом наблюдается положительный рост TIN на $10 \pm 2\%$. В течение первой декады (1982–1992) на графике TIN наблюдаются заметные годовые вариации, далее характер вариаций качественно изменяется. В 1996–2001 гг. TIN показывает устойчивый рост, сменяющийся фазой резкого трёхлетнего падения. Начиная с 2004 г. наблюдается монотонный, за исключением

небольшого локального минимума в 2009 г., рост TIN до максимального за весь исследуемый период значения (5,05) в 2012 г., затем за максимумом следует резкий спад и наблюдаются небольшие вариации.

Для исследования сезонной динамики растительности (май–сентябрь) в ОИ были построены среднемесячные тренды NDVI для 1982–2022, 2004–2012 и 2012–2017 гг., значения которых представлены в табл. 2. Анализ среднемесячных трендов NDVI показывает, что прирост TIN в 1982–2022 гг. в ОИ ожидаемо обусловлен летними месяцами, при этом наибольший вклад в TIN внесло увеличение NDVI в июне ($18 \pm 5\%$), который хорошо коррелирует с температурой июня (коэффициент корреляции (далее R) 0,88), при этом повышение температуры составило $5,5 \pm 2,1$ °C. Рост (2004–2012) и спад (2012–2017) TIN во многом обусловлен соответствующими изменениями NDVI в мае, который также тесно связан с температурой мая ($R = 0,85$). В мае в течение 2004–2012 гг. наблюдается устойчивый рост NDVI на $14 \pm 4\%$, а в 2012–2017 гг., напротив, — значительное снижение NDVI на $30 \pm 5\%$.

Таблица 2. Среднемесячные тренды относительных изменений NDVI в ОИ за разные периоды. Звёздочкой (*) отмечены статистически значимые тренды ($p < 0,05$)

Месяц	1982–2022 гг., %	2004–2012 гг., %	2012–2017 гг., %
Май	5 ± 7	$14 \pm 4^*$	$-30 \pm 5^*$
Июнь	$18 \pm 5^*$	$8 \pm 4^*$	-10 ± 2
Июль	$13 \pm 2^*$	1 ± 1	6 ± 2
Август	$10 \pm 3^*$	0 ± 2	9 ± 2
Сентябрь	0 ± 4	$9 \pm 2^*$	$-12 \pm 1^*$

Среднедекадные графики сезонного хода индекса NDVI (1982–1991, 1992–2001, 2002–2011 и 2012–2022), представленные на рис. 6а, показывают устойчивый рост NDVI в летние месяцы (июнь, июль, август). При этом заметно, что наибольшее увеличение индекса наблюдается в июне. На рис. 6б представлен сезонный ход NDVI в годы минимума TIN (2004, 2017) и в год максимума 2012 г. В наиболее благоприятный для вегетации 2012 г. наибольший вклад в интегральный показатель TIN оказали май и июнь по сравнению с неблагоприятными 2004 и 2017 гг.; сезон вегетации 2012 г. оказался также наиболее продолжительным.

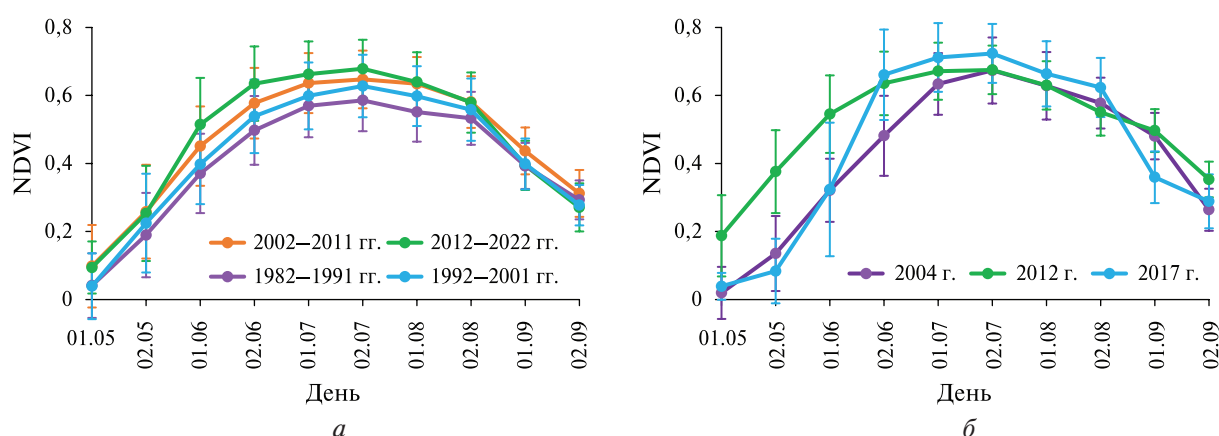


Рис. 6. Графики сезонного хода NDVI в ОИ: а — усреднённые по декадам (1982–1991, 1992–2001, 2002–2011, 2012–2022), б — в 2004, 2012, 2017 гг.

Сопоставление вариаций TIN в ОИ с приземной температурой воздуха за май–сентябрь ($T_{\text{м-с}}$ — данные ERA5; $T_{\text{м-с}}^*$ — данные метеостанций), продолжительностью тёплого периода (ТП10), количеством дней с ОП и атмосферными осадками за май–сентябрь ($AO_{\text{м-с}}$ — дан-

ные ERA5; AO_{M-C}^* — данные метеостанций) за 1982–2022 гг. показано на *рис. 7*. Как следует из *рис. 7а*, вариации TIN и T_{M-C} в целом хорошо согласуются, коэффициент корреляции R составил 0,76. При этом вариации T_{M-C} по данным ERA5 хорошо согласуются ($R = 0,98$) с вариациями T_{M-C}^* , полученными по данным метеостанций; однако значения наземных станций несколько выше. Следует отметить, что в периоды наиболее заметного прироста (2004–2012) и спада (2012–2017) TIN наблюдается соответствующий рост T_{M-C} на $2,2 \pm 0,8$ °C и снижение T_{M-C} на $3,0 \pm 0,2$ °C. Аналогичная динамика наблюдается в вариациях ТП10 (см. *рис. 7б*): в 2004–2012 гг. отмечается значительное увеличение продолжительности ТП10 на 50 ± 11 дней, а в 2012–2017 гг. — сокращение на 16 ± 13 дней. Корреляция между TIN и ТП10 составляет $R = 0,69$. Вариации облачного покрова (см. *рис. 7в*) в те же годы (2004–2012 и 2012–2017) демонстрируют значительное сокращение (30 ± 3 дня) и увеличение (24 ± 3 дня) количества дней с облачностью за период май–сентябрь. При этом связь TIN с ОП за 1982–2022 гг. в целом невысокая ($R = -0,44$). Однако в период заметного устойчивого роста и спада TIN (2004–2017) коэффициент корреляции составил $R = -0,92$. Между TIN и атмосферными осадками в мае–сентябре AO_{M-C} (см. *рис. 7г*) связь отсутствует ($R = -0,04$), а значительных изменений в вариациях AO_{M-C} и AO_{M-C}^* как для всего периода исследований, так и в 2004–2012 и 2012–2017 гг. не наблюдается. Наземные данные по AO_{M-C}^* хорошо согласуются с данными AO_{M-C} , однако значения атмосферных осадков, полученных с метеостанций заметно ниже, чем данные реанализа.

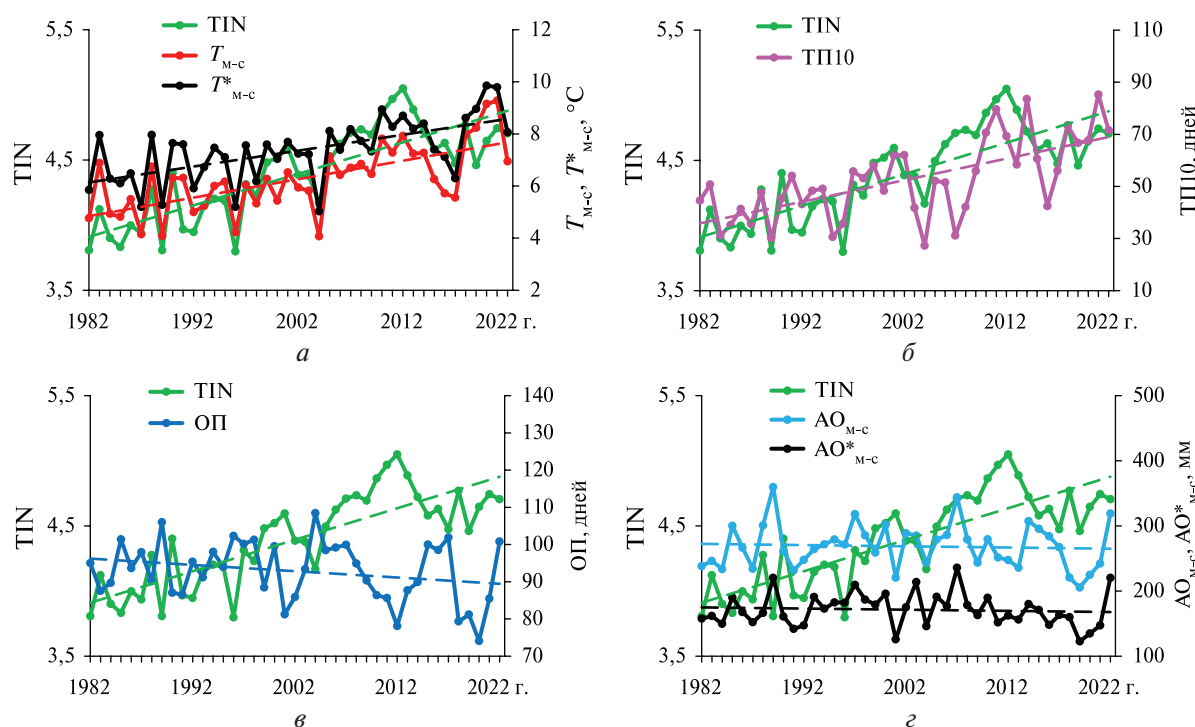


Рис. 7. Межгодовые вариации исследуемых параметров в ОИ: а — TIN, T_{M-C} и T_{M-C}^* ; б — TIN и ТП10; в — TIN и ОП и г — TIN, AO_{M-C} и AO_{M-C}^* . Штриховыми линиями показаны тренды параметров соответствующего цвета

Таким образом, в 2004–2012 и 2012–2017 гг. наблюдаются значительные изменения T_{M-C} , ТП10 и ОП, которые в совокупности определили соответствующую динамику интегрального индекса TIN в эти периоды. Рост приземной температуры воздуха, а также значительное увеличение тёплого периода и количества безоблачных дней на севере Сибири положительно сказались на состоянии растительного покрова и определили стабильную динамику роста TIN в ОИ в 2004–2012 гг., соответственно, ухудшение благоприятных факторов привело к падению TIN в 2012–2017 гг.

Изменения сроков начала сезона вегетации (SOS) в ОИ за исследуемый период представлены на *рис. 8* (график зелёного цвета). Как следует из *рис. 8*, SOS варьирует в широком диапазоне времени (~1 мес) и охватывает даты с примерно середины мая до приблизительно середины июня, при этом тренд статистически незначим. Однако в 2004–2012 гг. наблюдается относительно устойчивый сдвиг SOS на более ранние сроки (16 ± 4 дня), а в 2012–2017 гг. — быстрое смещение SOS на более поздние сроки (24 ± 3 дня).

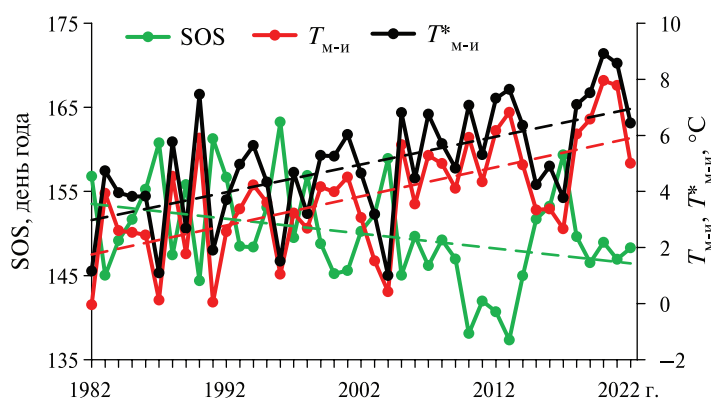


Рис. 8. Межгодовые вариации сроков начала вегетации (SOS) и приземной температуры воздуха за период май–июнь ($T_{\text{м-и}}$, $T^*_{\text{м-и}}$) в ОИ

Для анализа вариаций SOS рассмотрена динамика приземной температуры воздуха, усреднённой за период май–июнь ($T_{\text{м-и}}$ — данные ERA5; $T^*_{\text{м-и}}$ — данные метеостанций), на который приходятся сроки SOS в 1982–2022 гг. Показано (см. *рис. 8*), что вариации SOS и $T_{\text{м-и}}$ хорошо коррелируют ($R = -0,79$). Значительный рост $T_{\text{м-и}}$ на $3,4 \pm 1,5$ °C в 2004–2012 гг. обусловил более раннее начало сезона вегетации, а резкое снижение $T_{\text{м-и}}$ в 2012–2017 гг. на $5,0 \pm 0,7$ °C — смещение SOS на более поздние сроки. В течение всего исследуемого периода отмечается рост $T_{\text{м-и}}$ на $4,2 \pm 1,6$ °C. Вариации $T_{\text{м-и}}$, построенные по данным ERA5, хорошо согласуются ($R = 0,99$) с данными метеостанций $T^*_{\text{м-и}}$; однако наземные данные (*in situ*) несколько выше данных реанализа.

Ранее в работе (Варламова, Соловьев, 2024) было показано, что на севере Сибири в 1982–2022 гг. в условиях значительного роста весенней температуры воздуха наблюдается тенденция более раннего схода снежного покрова. Как известно, в арктической зоне Сибири, где растительный покров представлен в основном редколесьем и большим количеством кустарниковой и травянистой растительности, продолжительность залегания снежного покрова в весенний период оказывает заметное влияние на сроки начала сезона вегетации. Вероятно, значительный сдвиг SOS на более ранние сроки в 2004–2012 гг. обусловлен устойчивым ростом весенней температуры воздуха и, соответственно, более ранним началом таяния снежного покрова.

Заключение

На основе данных вегетационного индекса NDVI (GIMMS-3G+) проведено исследование пространственно-временных изменений показателей растительного покрова Сибири в условиях арктического усиления потепления климата за период 1982–2022 гг. Основные выводы исследования заключаются в следующем.

На территории Сибири за рассматриваемый период преобладает положительная (3 ± 1 %) тенденция интегрального индекса TIN на фоне роста среднегодовой температуры воздуха на $2,1 \pm 0,8$ °C. Положительные значения трендов TIN занимают 77 % территории Сибири, из которых 48 % статистически значимые ($p < 0,05$). Отрицательные тренды TIN занимают 23 %, из которых статистически значимые 6 %.

На севере Якутии выше 65-й параллели северной широты в зоне лесотундры и тундры выявлена область (ОИ) с аномально высоким ростом TIN (10 ± 2 %). Наблюдаемая динамика TIN обусловлена температурным фактором — температура воздуха $T_{\text{м-с}}$ выросла в среднем на $3,1 \pm 1$ °С, при этом средняя продолжительность тёплого периода (ТП10) увеличилась на 36 ± 11 дней. На отдельных, локальных участках в ОИ за весь исследуемый период максимальный рост TIN достигает ~22 %, а повышение $T_{\text{м-с}}$ и увеличение ТП10 составляют ~4 °С и ~60 дней соответственно.

В 2004–2012 гг. в ОИ наблюдается устойчивый рост TIN (7 ± 1 %) и сдвиг SOS на максимально ранние сроки (16 ± 4 дня). В это же время наблюдается значительное повышение приземной температуры воздуха $T_{\text{м-с}}$ на $2,2 \pm 0,8$ °С, $T_{\text{м-и}}$ на $3,4 \pm 1,5$ °С, увеличение ТП10 на 50 ± 11 дней и сокращение количества дней с облачностью на 30 ± 3 дня. Напротив, в 2012–2017 гг. в ОИ наблюдается устойчивое снижение TIN на 7 ± 1 % и смещение SOS на более поздние сроки (24 ± 3 дня). Уменьшение показателей растительности отмечается в условиях значительного понижения температуры воздуха $T_{\text{м-с}}$ на $3,0 \pm 0,2$ °С, $T_{\text{м-и}}$ на $5,0 \pm 0,7$ °С, сокращения ТП10 на 16 ± 13 дней и увеличения ОП на 24 ± 3 дня.

Данные реанализа по температуре воздуха и атмосферным осадкам в целом хорошо коррелируют с результатами наземных измерений, однако значения абсолютных показателей заметно разнятся.

Таким образом, определяющими факторами динамики растительного покрова на севере Сибири является приземная температура воздуха и облачность. Общая картина тенденции роста растительности на территории Сибири за 1982–2022 гг. согласуется с ранее полученными результатами (Kirdyanov et al., 2024; Liu et al., 2025).

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

Литература

1. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швеиц Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485. Рег. 23.10.2014.
2. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., Швеиц Н. В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. Рег. 27.02.2015.
3. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Региональные особенности схода снежного покрова в Сибири в условиях быстрого потепления Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 284–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-284-297.
4. Карбасникова Е. Б., Бабич Н. А., Карбасников А. А. Особенности сезонного развития лиственницы (*Larix* Mill.) в условиях южной подзоны тайги // Лесной вестн. 2020. Т. 24. № 3. С. 53–59. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59.
5. Суворова Г. Г., Попова Е. В. Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области / отв. ред. Р. К. Салаев. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. 95 с.
6. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R. A review of vegetation indices // Remote Sensing Reviews. 1995. V. 13. Iss. 1–2. P. 95–120. DOI: 10.1080/02757259509532298.
7. Barichivich J., Briffa K. R., Osborn T. J. et al. Thermal growing season and timing of biospheric carbon uptake across the Northern Hemisphere // Global Biogeochemical Cycles. 2012. V. 26. Iss. 4. Article GB4015. DOI: 10.1029/2012GB004312.
8. Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S. A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 9. P. 1977–1982. DOI: 10.1080/0143116031000066297.
9. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al. Climate drivers of Arctic tundra variability and change using an indicators framework // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. No. 5. Article 055019. DOI: 10.1088/1748-9326/abe676.
10. Eklundh L., Jönsson P. TIMESAT: A software package for time-series processing and assessment of vegetation dynamics // Remote Sensing Time Series. 2015. V. 22. P. 141–158. DOI: 10.1007/978-3-319-15967-6_7.

11. England M. R., Eisenman I., Lutsko N. J., Wagner T. J. W. The recent emergence of Arctic Amplification // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. Iss. 15. Article e2021GL094086. DOI: 10.1029/2021GL094086.
12. Goward S. N., Markham B., Dye D. G. et al. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer // *Remote Sensing of Environment*. 1991. V. 35. Iss. 2–3. P. 257–277. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90017-Z.
13. Heijmans M. M. P. D., Magnússon R. Í., Lara M. J. et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022. V. 3. Iss. 1. P. 68–84. DOI: 10.1038/s43017-021-00233-0.
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
15. Huang Z., Zhou L., Zhong D. et al. Declined benefit of earlier spring greening on summer growth in northern ecosystems under future scenarios // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2024. V. 351. Article 110019. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.110019.
16. Huemmrich K. F., Gamon J., Campbell P. et al. 20 years of change in tundra NDVI from coupled field and satellite observations // *Environmental Research Letters*. 2023. V. 18. No. 9. Article 094022. DOI: 10.1088/1748-9326/acce17.
17. Ji L., Fan K., Tian Y. Nonstationary linkage between summer warmth index and NDVI at high latitudes in Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2025. V. 20. No. 1. Article 014034. DOI: 10.1088/1748-9326/ad97d2.
18. Kirdyanov A. V., Kolmogorov A. I., Kruse S. et al. Arctic amplification causes earlier onset of seasonal tree growth in northeastern Siberia // *Environmental Research Letters*. 2024. V. 19. No. 11. Article 114091. DOI: 10.1088/1748-9326/ad845f.
19. Li H., Wang C., Zhang L. et al. Satellite monitoring of boreal forest phenology and its climatic responses in Eurasia // *Intern. J. Remote Sensing*. 2017. V. 38. Iss. 19. P. 5446–5463. DOI: 10.1080/01431161.2017.1339925.
20. Li C., Zhuang D., He J., Wen K. Spatiotemporal variations in remote sensing phenology of vegetation and its responses to temperature change of boreal forest in tundra-taiga transitional zone in the Eastern Siberia // *J. Geographical Sciences*. 2023. V. 33. No. 3. P. 464–482. DOI: 10.1007/s11442-023-2092-z.
21. Liu Y., Wu X., Wu T. et al. Climate warming controls vegetation growth with increasing importance of permafrost degradation in the Northern Hemisphere during 1982–2022 // *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Iss. 1. Article 104. DOI: 10.3390/rs17010104.
22. Magnússon R. Í., Groten F., Bartholomeus H. et al. Tundra browning in the Indigirka Lowlands (northeastern Siberia) explained by drought, floods and small-scale vegetation shifts // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2023. V. 128. Iss. 7. Article e2022JG007330. DOI: 10.1029/2022JG007330.
23. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. V. 13. P. 245–259. DOI: 10.2307/1907187.
24. Mekonnen Z. A., Riley W. J., Berner L. T. et al. Arctic tundra shrubification: a review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. No. 5. Article 053001. DOI: 10.1088/1748-9326/abf28b.
25. Pinzon J. E., Pak E. W., Tucker C. J. et al. Global Vegetation Greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3G+, 1981–2022. Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL Distributed Active Archive Center, 2023. DOI: 10.3334/ORNLDAAAC/2187.
26. Potter C., Alexander O. Changes in vegetation phenology and productivity in Alaska over the past two decades // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 10. Article 1546. DOI: 10.3390/rs12101546.
27. Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth and Environment*. 2022. V. 3. No. 1. Article 168. 10 p. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
28. Rigge M., Smart A., Wylie B. et al. Linking phenology and biomass productivity in South Dakota mixed-grass prairie // *Rangeland Ecology and Management*. 2013. V. 66. Iss. 5. P. 579–587. DOI: 10.2111/REM-D-12-00083.1.
29. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp. NASA SP-351*. 1974. V. 1. P. 309–317.
30. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Analytical Chemistry*. 1964. V. 36. Iss. 8. P. 1627–1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
31. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau // *J. American Statistical Association*. 1968. V. 63. P. 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
32. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C. et al. The emergence of surface-based Arctic amplification // *The Cryosphere*. 2009. V. 3. Iss. 1. P. 11–19. DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.

33. Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle D. Relations between NDVI, grassland production, and crop yield in the Central Great Plains // *Geocarto Intern.* 2005. V. 20. Iss. 3. P. 5–11. DOI: 10.1080/10106040508542350.
34. Wei Y., Yu M., Wei J., Zhou B. Impacts of extreme climates on vegetation at middle-to-high latitudes in Asia // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Iss. 5. Article 1251. DOI: 10.3390/rs15051251.
35. White M. A., Thornton P. E., Running S. W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability // *Global Biogeochemical Cycles*. 1997. V. 11. Iss. 2. P. 217–234. DOI: 10.1029/97GB00330.
36. White M. A., De Beurs K. M., Didan K. *et al.* Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // *Global Change Biology*. 2009. V. 15. Iss. 10. P. 2335–2359. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.
37. Zeng L., Wardlaw B. D., Xiang D. *et al.* A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 237. Article 111511. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111511.
38. Zhang G., Wang H., Zhang S. *et al.* Spring phenology and productivity alter vegetation vulnerability under summer droughts over Northern Hemisphere // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2025. V. 368. Article 110555. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110555.
39. Zuev V. V., Korotkova E. M., Pavlinsky A. V. Climate-related changes in the vegetation cover of the taiga and tundra of West Siberia over the period of 1982–2015 based on satellite data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. P. 1072–1079. DOI: 10.1134/S0001433820090297.

Features of spatiotemporal dynamics of vegetation in Siberia under Arctic amplification of climate warming

E. V. Varlamova, V. S. Solovyev

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
Yakutsk 677027, Russia*

E-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

The fast Arctic warming (Arctic amplification) has a significant impact on northern ecosystems, including vegetation, which is a key participant in the carbon cycle regulating atmospheric CO₂ concentration. A research of vegetation spatiotemporal changes in Siberia under Arctic amplification using NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) from GIMMS-3G+ (Global Inventory Modeling and Mapping Studies-3rd Generation V1.2) data set was carried out for 1982–2022. It is shown that under conditions of annual air temperature increase by 2.1 ± 0.8 °C, there is a positive (3 ± 1 %) trend in the time-integrated NDVI (Time Integrated NDVI — TIN) in Siberia. A region with the highest values of statistically significant increase of TIN by 10 ± 2 % is found in the north where the maximum increase of TIN reaches ~22 % in local areas. In 2004–2012, there was a lengthy steady increase of TIN (7 ± 1 %) and a corresponding shift to an early start of the growing season (16 ± 4 days), while during 2012–2017 there was a rapid decline of TIN by 7 ± 1 % with a shift to a late start of the growing season (24 ± 3 days). The observed changes in vegetation were mainly due to the temperature effects. The steady increase of TIN by 7 ± 1 % in 2004–2012 was due to the lengthening of the warm season by 50 ± 11 days, the increase of surface air temperature by 2.2 ± 0.8 °C and the lengthening of the number of clear days by 30 ± 3 days. The rapid decline of TIN in 2012–2017 occurred against the background of the warm season shortening by 16 ± 13 days, the decrease in air temperature by 3.0 ± 0.2 °C and the reduction in number of clear days by 24 ± 3 days.

Keywords: vegetation cover, start date of the growing season, Arctic amplification, Siberia, NDVI, GIMMS

Accepted: 01.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-234-249

References

1. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Trofimenko L. T., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury vozdukh na stantsiyakh Rossii* (Description of the data set of monthly mean air temperature at stations in Russia), Certificate of state registration of the database No. 2014621485 (RU), Reg. 23.10.2014 (in Russian).
2. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii* (Description of the data set of monthly sum of precipitation at stations in Russia), Certificate of state registration of the database No. 2015620394 (RU), Reg. 27.02.2015 (in Russian).
3. Varlamova E. V., Solovyev V. S., Regional features of snow cover disappearance in Siberia under fast Arctic warming, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 284–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-284-297.
4. Karbasnikova E. B., Babich N. A., Karbasnikov A. A., Peculiarities of larch (*Larix* Mill.) seasonal development in conditions of south taiga sub-zone, *Forestry Bull.*, 2020, V. 24, No. 3, pp. 53–59 (in Russian), DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59.
5. Suvorova G. G., Popova E. V., *Fotosinteticheskaya produktivnost' khvoinykh drevostoev Irkutskoi oblasti* (Photosynthetic productivity of coniferous forests in Irkutsk region), R. K. Salyaev (ed.), Novosibirsk: Akademicheskoe izd. "Geo", 2015, 95 p. (in Russian).
6. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R., A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, 1995, V. 13, Iss. 1–2, pp. 95–120, DOI: 10.1080/02757259509532298.
7. Barichivich J., Briffa K. R., Osborn T. J. et al., Thermal growing season and timing of biospheric carbon uptake across the Northern Hemisphere, *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, V. 26, Iss. 4, Article GB4015, DOI: 10.1029/2012GB004312.
8. Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S., A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, V. 24, No. 9, pp. 1977–1982, DOI: 10.1080/0143116031000066297.
9. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al., Climate drivers of Arctic tundra variability and change using an indicators framework, *Environmental Research Letters*, 2021, V. 16, No. 5, Article 055019, DOI: 10.1088/1748-9326/abe676.
10. Eklundh L., Jönsson P., TIMESAT: A software package for time-series processing and assessment of vegetation dynamics, *Remote Sensing Time Series*, 2015, V. 22, pp. 141–158, DOI: 10.1007/978-3-319-15967-6_7.
11. England M. R., Eisenman I., Lutsko N. J., Wagner T. J. W., The recent emergence of Arctic Amplification, *Geophysical Research Letters*, 2021, V. 48, Iss. 15, Article e2021GL094086, DOI: 10.1029/2021GL094086.
12. Goward S. N., Markham B., Dye D. G. et al., Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer, *Remote Sensing of Environment*, 1991, V. 35, Iss. 2–3, pp. 257–277, DOI: 10.1016/0034-4257(91)90017-Z.
13. Heijmans M. M. P. D., Magnússon R. Í., Lara M. J. et al., Tundra vegetation change and impacts on permafrost, *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, V. 3, Iss. 1, pp. 68–84, DOI: 10.1038/s43017-021-00233-0.
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2020, V. 146, Iss. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
15. Huang Z., Zhou L., Zhong D. et al., Declined benefit of earlier spring greening on summer growth in northern ecosystems under future scenarios, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, V. 351, Article 110019, DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.110019.
16. Huemmrich K. F., Gamon J., Campbell P. et al., 20 years of change in tundra NDVI from coupled field and satellite observations, *Environmental Research Letters*, 2023, V. 18, No. 9, Article 094022, DOI: 10.1088/1748-9326/acee17.
17. Ji L., Fan K., Tian Y., Nonstationary linkage between summer warmth index and NDVI at high latitudes in Eurasia, *Environmental Research Letters*, 2025, V. 20, No. 1, Article 014034, DOI: 10.1088/1748-9326/ad97d2.
18. Kirilyanov A. V., Kolmogorov A. I., Kruse S. et al., Arctic amplification causes earlier onset of seasonal tree growth in northeastern Siberia, *Environmental Research Letters*, 2024, V. 19, No. 11, Article 114091, DOI: 10.1088/1748-9326/ad845f.
19. Li H., Wang C., Zhang L. et al., Satellite monitoring of boreal forest phenology and its climatic responses in Eurasia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, V. 38, Iss. 19, pp. 5446–5463, DOI: 10.1080/01431161.2017.1339925.

20. Li C., Zhuang D., He J., Wen K., Spatiotemporal variations in remote sensing phenology of vegetation and its responses to temperature change of boreal forest in tundra-taiga transitional zone in the Eastern Siberia, *J. Geographical Sciences*, 2023, V. 33, No. 3, pp. 464–482, DOI: 10.1007/s11442-023-2092-z.
21. Liu Y., Wu X., Wu T. et al., Climate warming controls vegetation growth with increasing importance of permafrost degradation in the Northern Hemisphere during 1982–2022, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, Iss. 1, Article 104, DOI: 10.3390/rs17010104.
22. Magnússon R. Í., Groten F., Bartholomeus H. et al., Tundra browning in the Indigirka Lowlands (northeastern Siberia) explained by drought, floods and small-scale vegetation shifts, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, V. 128, Iss. 7, Article e2022JG007330, DOI: 10.1029/2022JG007330.
23. Mann H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, V. 13, pp. 245–259, DOI: 10.2307/1907187.
24. Mekonnen Z. A., Riley W. J., Berner L. T. et al., Arctic tundra shrubification: a review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance, *Environmental Research Letters*, 2021, V. 16, No. 5, Article 053001, DOI: 10.1088/1748-9326/abf28b.
25. Pinzon J. E., Pak E. W., Tucker C. J. et al., *Global Vegetation Greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3G+, 1981–2022*, Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL Distributed Active Archive Center, 2023, DOI: 10.3334/ORNLDAAC/2187.
26. Potter C., Alexander O., Changes in vegetation phenology and productivity in Alaska over the past two decades, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Iss. 10, Article 1546, DOI: 10.3390/rs12101546.
27. Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A. et al., The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979, *Communications Earth and Environment*, 2022, V. 3, No. 1, Article 168, 10 p., DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
28. Rigge M., Smart A., Wylie B. et al., Linking phenology and biomass productivity in South Dakota mixed-grass prairie, *Rangeland Ecology and Management*, 2013, V. 66, Iss. 5, pp. 579–587, DOI: 10.2111/REM-D-12-00083.1.
29. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp.*, NASA SP-351, 1974, V. 1, pp. 309–317.
30. Savitzky A., Golay M. J. E., Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical Chemistry*, 1964, V. 36, Iss. 8, pp. 1627–1639, DOI: 10.1021/ac60214a047.
31. Sen P. K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau, *J. American Statistical Association*, 1968, V. 63, pp. 1379–1389, DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
32. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C. et al., The emergence of surface-based Arctic amplification, *The Cryosphere*, 2009, V. 3, Iss. 1, pp. 11–19, DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
33. Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle D., Relations between NDVI, grassland production, and crop yield in the Central Great Plains, *Geocarto Intern.*, 2005, V. 20, Iss. 3, pp. 5–11, DOI: 10.1080/10106040508542350.
34. Wei Y., Yu M., Wei J., Zhou B., Impacts of extreme climates on vegetation at middle-to-high latitudes in Asia, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 5, Article 1251, DOI: 10.3390/rs15051251.
35. White M. A., Thornton P. E., Running S. W., A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability, *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, V. 11, Iss. 2, pp. 217–234, DOI: 10.1029/97GB00330.
36. White M. A., De Beurs K. M., Didan K. et al., Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006, *Global Change Biology*, 2009, V. 15, Iss. 10, pp. 2335–2359, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.
37. Zeng L., Wardlow B. D., Xiang D. et al., A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 237, Article 111511, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111511.
38. Zhang G., Wang H., Zhang S. et al., Spring phenology and productivity alter vegetation vulnerability under summer droughts over Northern Hemisphere, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, V. 368, Article 110555, DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110555.
39. Zuev V. V., Korotkova E. M., Pavlinsky A. V., Climate-related changes in the vegetation cover of the taiga and tundra of West Siberia over the period of 1982–2015 based on satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, V. 56, pp. 1072–1079, DOI: 10.1134/S0001433820090297.