

УДК 911.9:528.8

DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

Оригинальная статья

Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России)

К.В. Мячина^{1,2}, И.А. Керимов², Р.В. Ряхов¹, С.А. Дубровская^{1,2}

¹ Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН, Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, e-mail: mavicsen@gmail.com;

² ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100

Статья поступила: 24.11.2023, доработана: 27.02.2024, принята к публикации: 28.02.2024

Резюме: Актуальность работы. Проблема оценки поглотительного потенциала ландшафтов в отношении диоксида углерода приобретает все большую актуальность в связи с глобальными изменениями климата. Разворачиваются исследования, использующие возможности спутниковых снимков для оценки поглотительной способности ландшафтов и запасов углерода. **Цель работы** – выявить особенности пространственно-временной динамики поглотительной способности российских горнолесных, лесостепных и степных ландшафтов в отношении атмосферного диоксида углерода. **Объекты.** В качестве регионов исследования выбраны Чеченская Республика и центральная часть Оренбургской области, где выделены в общей сложности семь ключевых участков, шесть из которых входят в состав карбонового полигона «Way Carbon». Требовалось, чтобы ключевые участки отличались разнообразием геоэкологических характеристик, охватывая горнолесную, лесостепную и степную природные зоны. **Методы.** Выполнена тематическая обработка продуктов спутникового спектрорадиометра MODIS, что позволило рассчитать ежегодный показатель поглощения углерода (ППУ) за период с 2000 по 2020 гг. Произведено пространственное зонирование территории изучаемых регионов по ППУ, проанализированы временные тренды значений ППУ. Определены характеристики растительного покрова с помощью нормализованного вегетационного индекса NDVI, выполнена корреляция временных рядов значений ППУ со значениями NDVI. **Результаты.** Поглотительная способность ландшафтов Чеченской Республики увеличивается по направлению с севера на юг, отражая зональную смену природно-климатических условий: от степей и полупустынь в северных районах до предгорных луговых степей и горных лесов на юге, через лесостепные ландшафты в центре. В зонах с преобладанием лесов многолетний прирост значений ППУ минимален. Поглотительная способность ландшафтов центральной части Оренбургской области возрастает по направлению с юга на север: от сухой типчаково-ковыльной степи на юге до разнотравно-ковыльной и разнотравно-злаковой степи на севере. Пространственно-временные тренды ППУ в центральной части Оренбургской области не демонстрируют значимых колебаний. Анализ зависимостей между ежегодными средними значениями ППУ и NDVI для ключевых участков не выявил тесной положительной корреляционной связи, однако для лесного участка №5 прослеживается средняя отрицательная корреляция, что укладывается в рамки теории стабилизации и постепенного снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах.

Ключевые слова: степные, лесостепные и горнолесные ландшафты, потенциал поглощения углерода, пространственно-временная динамика, данные дистанционного зондирования, Чеченская Республика, Оренбургская область.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова ФЗНУ-2021-0012 (в части исследования ключевых участков №№ 1-6) и гос. задания Института степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1 (в части исследования ключевого участка № 7).

Для цитирования: Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1):141-151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

Original paper

Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples)

K.V. Myachina ^{1,2}, I.A. Kerimov ², R.V. Rakhov ¹, S.A. Dubrovskaya ^{1,2}

¹ Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 11 Pionerskaya Str., Orenburg 460000, Russian Federation, e-mail: mavicsen@gmail.com;

² Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 100 Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation

Received: 24.11.2023, revised: 27.02.2024, accepted: 28.02.2024

Abstract: Relevance. The problem of assessing the absorption capacity of landscapes for environmental dioxide seems relevant in connection with global climate change. Study is being launched, using the capabilities of satellite images to assess the absorption capacity of landscapes and carbon reserves. **The aim** of the paper is to identify the features of the spatio-temporal dynamics of the absorption capacities of Russian mountain forest, forest-steppe and steppe landscapes in relation to atmospheric dioxide. **Objects.** The Chechen Republic and the central part of the Orenburg region were chosen as the study regions, where a total of seven key plots were identified, six of which are part of the North Caucasus carbon test site "Way Carbon". It was required that the key plots are distinguished by a variety of geocological characteristics, covering mountain forest, forest-steppe and steppe natural zones. **Methods.** Thematic processing of MODIS products was carried out, which made it possible to calculate the annual carbon absorption rate (CAR) of landscapes for the period from 2000 to 2020. Spatial zoning of the studied regions according to CAR was carried out, and time trends of CAR values were analyzed. The characteristics of the vegetation cover were determined using the normalized vegetation index NDVI, and the time series of CAR values were correlated with NDVI. **Results.** The absorption capacity of the Chechen Republic landscapes increases from north to south, reflecting the zonal change in natural and climatic conditions: from steppes and semi-deserts in the northern regions to foothill meadow steppes and mountain forests in the south, through forest-steppe landscapes in the center. In areas with a predominance of forests, the long-term increase in CAR values is minimal. The absorptive capacity of the landscapes of the Orenburg region central part increases from south to north: from the dry fescue-feather grass steppe in the south to the forb-feather grass and forb-grass steppe in the north. The spatiotemporal trends of CAR in the central part of the Orenburg region do not show significant fluctuations. An analysis of the relationships between the annual average values of CAR and NDVI for key plots did not reveal a close positive correlation. However, for forest plot No. 5 an average negative correlation is traced, which fits within the framework of theories of stabilization and a gradual decrease in the absorptive capacity index in aged forests.

Keywords: steppe, forest-steppe and mountain forest landscapes, carbon sequestration potential, spatio-temporal dynamics, remote sensing data, Chechen Republic, Orenburg region.

Acknowledgements: The work was supported by the state assignment of the Grozny State Oil Technical University FZNU-2021-0012 (regarding the study of key sites No.1-6) and the state assignment of the Steppe Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences of the UB RAS AAAAA-A21-121011190016-1 (regarding the study of key site No.7).

For citation: Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A. Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 141-151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010

Введение

Глобальная проблема оценки поглотительного потенциала ландшафтов в отношении диоксида углерода приобретает все большую актуальность. Изучение цикла углеродсодержащих газов в различных природных и антропогенных условиях, анализ факторов варибельности объемов диоксида углерода в атмосфере, определение депонирующей способности типов почвенно-растительного покрова являются первоочередными эколого-экономическими задачами [Lewis, Maslin, 2015; Gleckler et al., 2016; Guo et al., 2017]. Доказано, что показатели поглощения и эмиссии CO₂ обусловлены, в основном, такими факторами, как природно-климатические условия местности, в первую очередь – особенностями почвенно-растительного покрова [Raich, Schlesinger, 1992; Lal, 2007; Махныкина и др., 2020]. Фотосинтез наземной фитомассой считается на данный момент наиболее рентабельным способом улавливания диоксида углерода [Chen et al., 2020; Lv et al., 2020].

В настоящее время разворачиваются исследования, использующие возможности спутниковых снимков для оценки поглотительной способности ландшафтов и запасов углерода. Установлено, что спектральные индексы, отражающие биофизические параметры растительной биомассы, положительно коррелируют с депонированием углерода [Yusandi et al., 2018; Wani et al., 2021] и отрицательно – с содержанием углерода в атмосфере [Lv et al., 2020; Marelign, Mekonen, 2022]. Существующие режимы и циклы космической съемки позволяют обеспечить точные регулярные замеры прироста наземной фитомассы и расчеты значений фотосинтеза. Полученная информация используется для вычисления показателей поглощения углерода в различных природно-климатических условиях [Schubert et al., 2010; Gelybó et al., 2013; Kross et al., 2013].

Цель работы – выявить особенности пространственных изменений и временной динамики поглотительной способности российских горнолесных, лесостепных и степных ландшафтов в отношении атмосферного диоксида углерода. Результаты будут обладать научной новизной и потенциалом в аспекте расширения и детализации направления исследований связи зональных характеристик ландшафтов с их возможностями поглощать углерод из атмосферы.

Методы исследования

В качестве регионов исследования выбраны Чеченская Республика и центральная часть Оренбургской области. Территория Чеченской Республики находится в пределах двух крупных физико-географических стран – Восточно-Европейской равнины и Крымско-Кавказской горной страны и характеризуется большим разнообразием природных ландшафтов: от полупустынных – на севере до нивально-гляциальных – на юге [Гуния и др., 2022]. Центральная часть Оренбургской области

расположена в степной зоне, где сменяют друг друга классические подзоны, включая типичную степь и южную сухую степь. Эти особенности также предполагают новизну и практическую значимость результатов исследования.

Для объективности и детализации выводов в регионах исследования выделены ключевые участки: шесть участков на территории Чеченской Республики, входящих в состав карбонового полигона «Way Carbon» [Гуния и др., 2022; Гуния и др., 2023; Керимов, Эльжаев, 2023], и один участок в Оренбургской области. Требовалось, чтобы выделенные ключевые участки отличались разнообразием геоэкологических характеристик, охватывая горнолесную, лесостепную и степную зоны (табл.1).

Таблица 1 / Table 1

**Краткая характеристика ключевых участков исследования /
Brief description of the key study plots**

№ участка, название, местоположение / Plot number, name, location	Площадь, га / Area, ha	Преобладающие типы ландшафтов / The prevailing types of landscapes
1. «Ханкала» (Кампус), Чеченская Республика / «Khankala» (Campus), Chechen Republic	18	Низкогорные лесостепные ландшафты / Low-altitude forest-steppe landscapes
2.«Карбоновая ферма», Чеченская Республика / «Carbon Farm», Chechen Republic	23	Горные степи Алханчуртской долины, разнотравно-злаковые степи / Mountain steppes of the Alkhanchurt valley, grass-grass steppes
3.«Толстой-Юрт», Чеченская Республика / «Tolstoy-Yurt», Chechen Republic	94	Низкогорные лесостепные ландшафты на северном склоне Терского хребта / Low-mountain forest-steppe landscapes on the northern slope of the Tersk ridge
4.«Старопромисловский», Чеченская Республика / «Staropromyslovskiy», Chechen Republic	41	Естественные и залежные степи межгорной котловины Терско-Сунженской возвышенности / Natural and fallow steppes of the intermountain basin of the Tersko-Sunzhenskaya upland
5.«Рошни-Чу», Чеченская Республика / «Roshni-Chu», Chechen Republic	243	Горно-лесная зона низкогорных ландшафтов на северном макросклоне Лесистого (Чёрногорского) хребта / Mountain-forest zone of low-mountain landscapes on the northern macroslope of the Forested (Chernogorsky) ridge
6.«Галанчожд», Чеченская Республика / «Galanchozh», Chechen Republic	51	Горно-луговолесные и горно-лугостепные ландшафты между отрогами Скалистого и Бокового хребтов / Mountain-meadow forest and mountain-meadow steppe landscapes between the spurs of the Rocky and Lateral ridges
7 Никольская степь, Оренбургская область / Nikolskaya steppe, Orenburg region	190	Сухостепные ландшафты с полыньково-тырсово-типчаково-ковыльной растительностью / Dry steppe with polynkovotyrsovo-tipchakovo-kovyl vegetation

В первую очередь, с учетом имеющихся рекомендаций [Heinsch et al., 2015], была выполнена тематическая обработка доступных данных дистанционного зондирования Земли – продуктов спутникового спектрорадиометра *MODIS*, что позволило рассчитать ежегодный показатель поглощения углерода (ППУ) растительным покровом в регионах исследования за период с 2000 по 2020 гг. На основе полученных значений произведено пространственное зонирование территории изучаемых регионов по ППУ, а также проанализированы временные тренды значений ППУ для семи ключевых участков. Для регионов исследования и участков определены характеристики растительного покрова с помощью нормализованного вегетационного индекса *NDVI* [Rouse et al., 1974], рассчитанного по снимкам спутников *Land-sat*, выполнена корреляция временных рядов значений ППУ со значениями рядов *NDVI*.

Результаты и обсуждение

Пространственное распределение средних за исследуемый период значений показателя поглощения углерода растительным покровом в регионах исследования представлено на рисунках 1, 2.

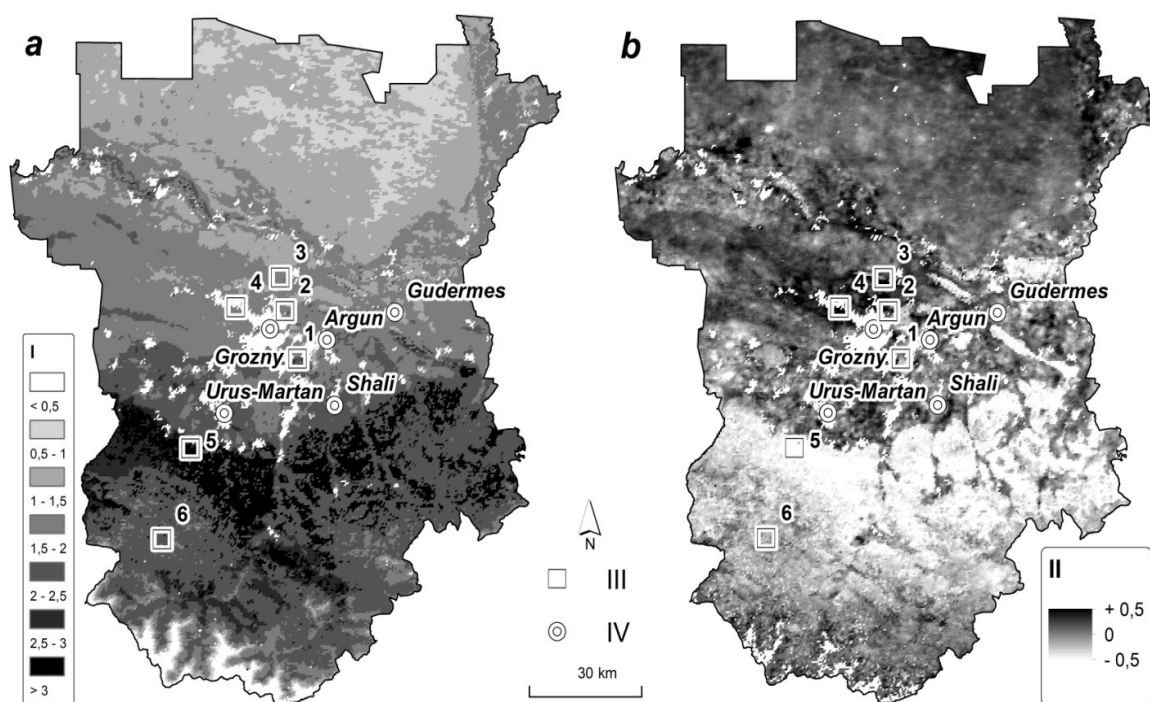


Рис. 1. Пространственное распределение на территории Чеченской Республики:
 а) средних значений показателя поглощения углерода ($\text{kgC}/\text{m}^2/\text{год}$),
 б) трендов значений показателя поглощения углерода за период с 2000 по 2020 гг.;
 I – диапазоны значений ППУ; II – черно-белый градиент тренда ППУ; III – ключевые участки
 исследования №№ 1-6; IV – населенные пункты /

Fig. 1. Spatial distribution on the territory of the Chechen Republic:
 а) average values of the carbon absorption index ($\text{kgC}/\text{m}^2/\text{year}$),
 б) trends in the values of the carbon absorption index for the period from 2000 to 2020;
 I – ranges of values of the carbon absorption index; II – black-and-white gradient of the carbon
 absorption index trend; III – key study plots No. 1-6; IV – settlements

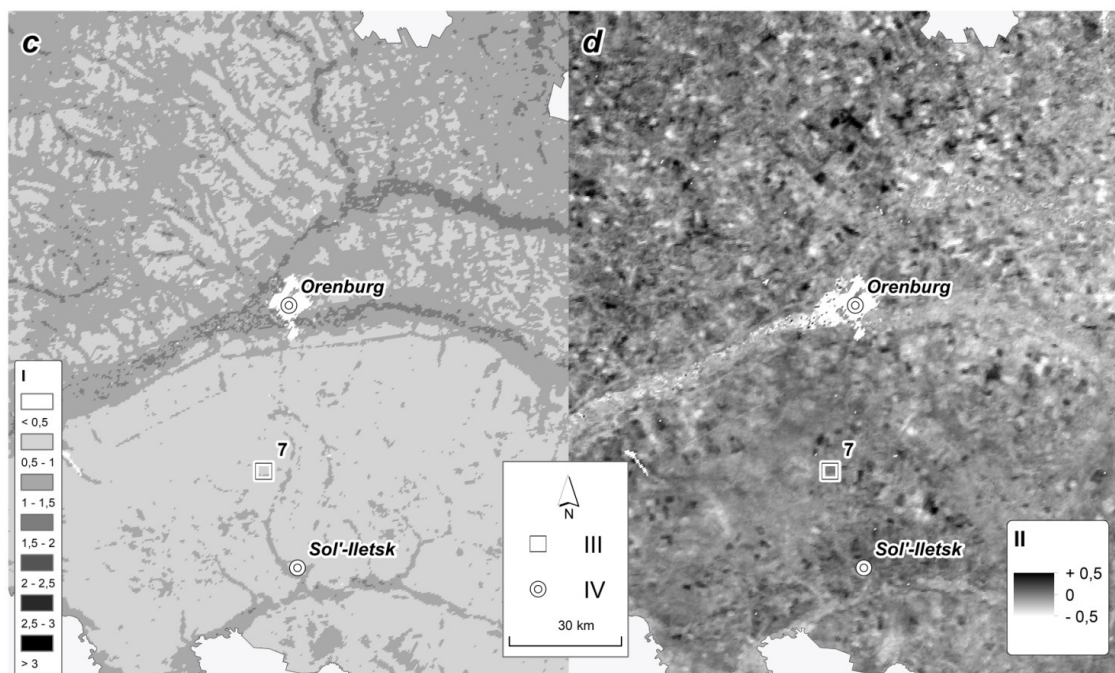


Рис. 2. Пространственное распределение в центральной части Оренбургской области: c) средних значений показателя поглощения углерода ($\text{кгC}/\text{м}^2/\text{год}$), d) трендов значений показателя поглощения углерода за период с 2000 по 2020 гг.; I – диапазоны значений ППУ; II – цветовой градиент тренда ППУ; III – ключевой участок исследования №7; IV – населенные пункты /

Fig. 2. Spatial distribution on the territory of the Orenburg region: a) average values of the carbon absorption index ($\text{kgC}/\text{m}^2/\text{year}$), b) trends in the values of the carbon absorption index for the period from 2000 to 2020; I – ranges of values of the carbon absorption index; II – black-and-white gradient of the carbon absorption index trend; III – key study plot No. 7; IV – settlements

Рисунок 1 в части *a* демонстрирует, что в масштабе региона поглотительная способность наземной фитомассы ландшафтов Чеченской Республики увеличивается по направлению с севера на юг, отражая зональную смену природно-климатических условий: от степей и полупустынь в северных районах, где значения ППУ представлены в диапазоне от 0,5 до 1 $\text{кгC}/\text{м}^2/\text{год}$, до предгорных луговых степей и горных лесов на юге, где значения ППУ превышают 3 $\text{кгC}/\text{м}^2/\text{год}$. В то же время, в части *b* рисунка 1, визуализирующей пространственно-временные тренды ППУ, видно, что в зонах с преобладанием лесов многолетний прирост значений ППУ минимален и не превышает 0,5 $\text{кгC}/\text{м}^2/\text{год}$. Существующие гипотезы объясняют это как снижением поглотительной способности в возрастных лесах за счет стабилизации валовой первичной продуктивности и непрерывного повышения автотрофного дыхания [Kira, Shidei, 1967], так и тем, что снижение поглотительной способности в многолетних лесах в первую очередь обусловлено снижением валовой первичной продуктивности, которая с возрастом уменьшается быстрее, чем автотрофное дыхание, но соотношение поглотительной способности и валовой первичной продуктивности остается примерно постоянным в пределах экосистемы [Tang et al., 2014]. Так или иначе, особенности поглотительной способности лесов – ее снижение у возрастного леса на фоне повышения или очень слабое снижение автотрофного дыхания – нельзя не принимать во внимание при построении прогнозных моделей и сценариев улавливания углерода в лесных, степных и смешанных экосистемах.

Рисунок 2 в части *c* показывает, что поглотительная способность ландшафтов центральной части Оренбургской области возрастает по направлению с юга на север, отражая зональную смену природно-климатических условий: от сухой типчково-ковыльной степи на юге с ППУ от 0,5 до 1 кгС/м²/год до разнотравно-ковыльной и разнотравно-злаковой степи на севере, где максимум ППУ достигает 1,5 кгС/м²/год. Пространственно-временные тренды ППУ в центральной части Оренбургской области не демонстрируют каких-либо значимых колебаний (рис. 2 в части *d*). Такая однородность (за исключением локальных пиков, привязанных к зонам антропогенного воздействия), связана, прежде всего, с условным однообразием растительного покрова, сохраняющимся, несмотря на смену подзональных вариантов.

Особый интерес представляют временные тренды ППУ на ключевых участках исследования (рисунок 3).

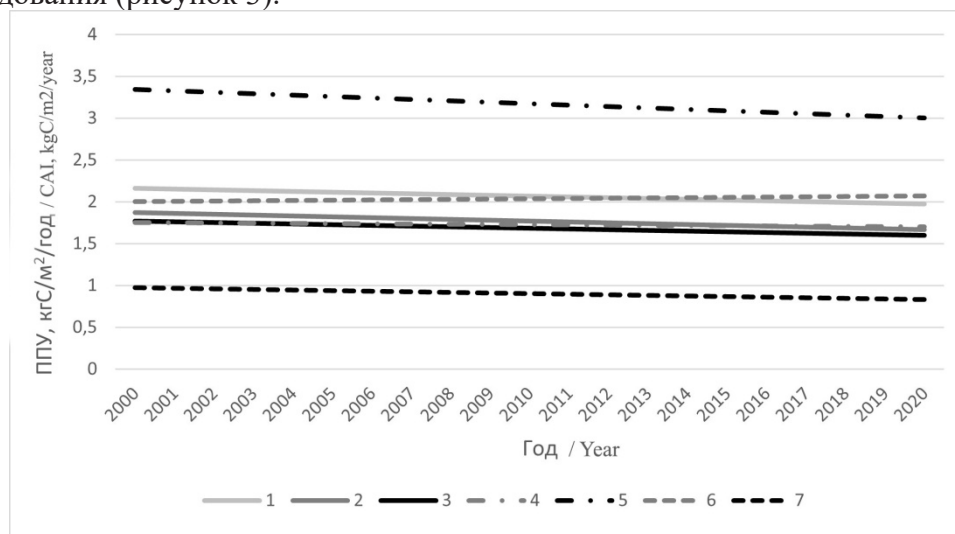


Рис. 3. Временные тренды значений показателя поглощения углерода растительностью на ключевых участках исследования №№ 1-7 /

Fig. 3. Time trends in the values of the carbon absorption index by vegetation in key plots of the study No. 1-7

Наблюдается явная тенденция к снижению объемов поглощаемого углерода на облесенном участке №5. Это согласуется с вышеприведенными теориями стабилизации и снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах за одно и более десятилетий. На фоне максимальной поглотительной способности лесов актуализируется вопрос о том, каков нижний порог, до которого могут опуститься значения ППУ на лесном участке №5 при неизменном состоянии лесных массивов в следующие десятилетия.

Не менее интересна нисходящая линия тренда ППУ на сухостепном участке №7. Судя по всему, на участках залежных или естественных многолетних степей действует аналогичный механизм стабилизации и постепенного снижения поглотительной способности.

На остальных участках исследования №№1-4 и №6 линии трендов либо стабильны, либо слабоотрицательны. Можно объяснить это разнородностью растительного покрова и систематическо-периодическим антропогенным воздействием, способствующим обновлению растительного покрова.

Динамика показателей *NDVI* по ключевым участкам за период наблюдений отображена на рис. 4.

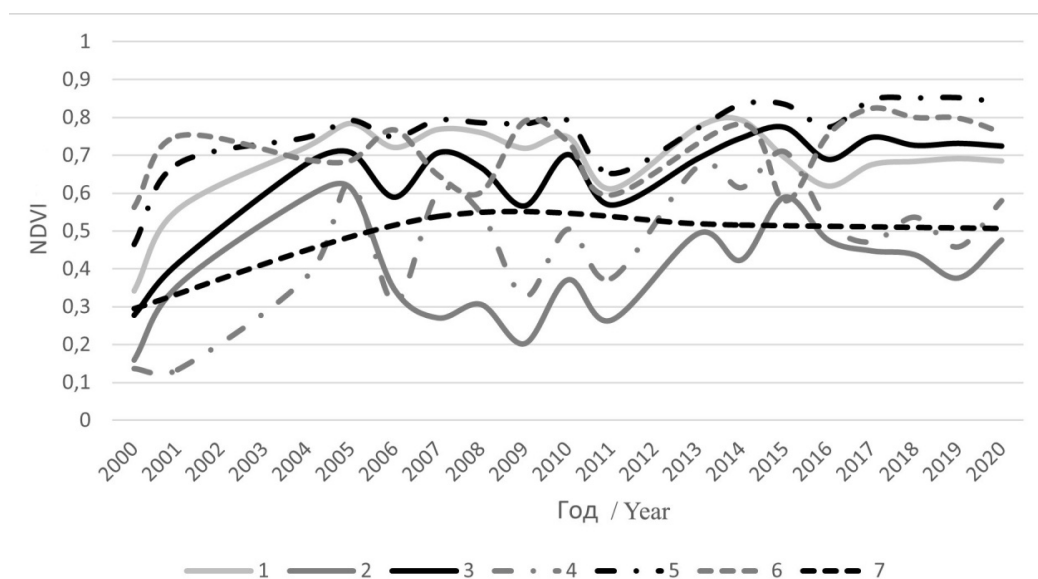


Рис. 4. Динамика показателей *NDVI* на ключевых участках исследования /

Fig. 4. Dynamics of *NDVI* indicators in key plots of the study

Можно выделить следующие особенности изменения вегетационного индекса на ключевых участках:

- на лесостепных участках №1, №3 и луговом участке №6 наблюдается устойчивая амплитуда показателей ($\pm 0,4$) и стремление к их стабилизации в последние 3–4 года изучаемого периода;

- степные, схожие по условиям увлажнения и расположенные недалеко друг от друга участки №2 и №4, отличаются схожей динамикой показателей *NDVI* и высокими амплитудами колебаний их значений;

- низкогорный лесной участок №5 характеризуется максимальным относительно других участков средним значением *NDVI* со стабильным трендом на повышение и наиболее низкой в Чеченской Республике амплитудой колебаний показателей ($\pm 0,3$);

- сухостепной участок №7 в Оренбургской области имеет наименьшее среднее многолетнее значение вегетационного индекса при низкой амплитуде колебаний его значений – в последние 14 лет изучаемого периода они почти стабильны.

Анализ зависимости между средними ежегодными значениями ППУ и *NDVI* для каждого участка не выявил тесной положительной корреляционной связи (значения коэффициента корреляции Пирсона находятся в диапазоне от 0,23 до 0,41), однако для лесного участка №5 прослеживается средняя отрицательная корреляция (-0,52). Таким образом, представляется, что неоправданно делать выводы об изменениях способности растительного покрова поглощать углерод, основываясь лишь на колебаниях значений индекса *NDVI*. Этот вегетационный индекс, характеризуя общее состояние наземной фитомассы, не учитывает индивидуальную поглотительную способность растительных фитоценозов. Тем не менее, в случае однородного лесного участка №5, где не происходит систематических антропогенных нарушений и изменений режимов природопользования, небольшая отрицательная корреляция показателей *NDVI* со значениями ППУ укладывается в рамки вышеприведенных теорий стабилизации и постепенного снижения показателя поглотительной способности в возрастных лесах.

Выводы

В масштабах регионов поглотительная способность ландшафтов изменяется, отражая зональную смену природно-климатических условий: минимальная поглотительная способность отмечается в зонах степей и полупустынь, максимальная – в зонах низкогорных смешанных лесов. Однако способность поглощать углерод на лесном участке будет со временем снижаться, и это необходимо принимать во внимание при построении прогнозных моделей и сценариев улавливания углерода в лесных, степных и смешанных экосистемах. Для определения функциональной зависимости такого снижения от возраста леса требуются дополнительные исследования.

Полученные авторами линии временного тренда позволяют предположить, что на степных участках поглотительная способность также будет со временем снижаться аналогично ситуации с возрастным лесом.

Результаты исследования призваны помочь в разработке решений по оптимизации природопользования в степных, лесостепных и горных ландшафтах.

Литература

1. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш., Гагаева З.Ш. Динамика соотношения фракций фитомассы и мортмассы на ключевых участках карбонового полигона в Чеченской Республике. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 135–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011.
2. Гуня А. Н., Петрушина М. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Современное состояние ландшафтов эталонных участков карбонового полигона Чеченской Республики. // Рациональное природопользование: традиции и инновации: Материалы III Международной конференции. М.: МГУ, 2022. – С. 170–174.
3. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.
4. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меньяло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в среднетаежных лесах центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы. // Экология. – 2020. – № 1. – С. 51–61. DOI: 10.31857/S0367059720010060.
5. Chen J., Fan W., Li D. et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration. // Applied Energy. – 2020. – Vol. 267. – pp. 114914. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114914.
6. Heinsch F., Reeves M., Votava P., Kang S., Milesi C., Nemani R. User's guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Version 2.0. – 2003. – pp. 1–57.
7. Gelybó Gy., Barcza Z., Kern A., Kljun N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. // Agricultural and Forest Meteorology. – 2013. – Vol. 174–175. – pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003.
8. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. // Nature Climate Change. – 2016. – Vol. 6. – No. 4. – pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
9. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. // Soil and Tillage Research. – 2017. – Vol. 174. – pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
10. Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. // Journal of Tropical Ecology. – 1967. – No. 17. – pp. 70–87. DOI: 10.18960/seitai.17.2_70.
11. Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T. et al. Estimating carbon dioxide exchange rates at

contrasting northern peatlands using MODIS satellite data. // *Remote Sensing of Environment*. – 2013. – Vol. 137. – pp. 234–243. DOI: 10.1016/j.rse.2013.06.014.

12. Lal R. Carbon sequestration. // *Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. – 2007. – Vol. 363. – pp. 815–830. DOI: 10.1098/rstb.2007.2185.

13. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. // *Nature*. – 2015. – Vol. 519. – No. 7542. – pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.

14. Lv Z, Shi Y, Zang S, Sun L. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO₂ Concentration in China and Its Influencing Factors. // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – No. 3. – pp. 231. DOI: 10.3390/atmos11030231.

15. Marehign M.A., Mekonen D.T. Estimating and mapping woodland biomass and carbon using Landsat 8 vegetation index: A case study in Dirmaga Watershed, Ethiopia. // *Computational Ecology and Software*. – 2022. – Vol. 12. – No. 2. – pp. 67–79.

16. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration to vegetation and climate. // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 1992. – Vol. 44. – No. 2. – pp. 81–99. DOI: 10.3402/tellusb.v44i2.15428.

17. Rouse J.W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. // *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. – 1974. – No. 1. – pp. 48–62.

18. Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO₂ exchange from MODIS time series data // *Remote Sensing Environment*. – 2010. – Vol. 114. – No. 6. – pp. 1178–1189. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.005.

19. Tang J., Luysaert S., Richardson A. D., Kutsch W., Janssens I. A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 111. – No. 24. – pp. 8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.1320761111.

20. Wani A.A., Bhat A.F., Gatoo A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. – 2021. – Vol. 26. – No. 1. – pp. 1–22. DOI: 10.1007/s11027-021-09937-6.

21. Yusandi S., Jaya I.N.S., Mulia F. Biomass estimation model for mangrove forest using medium-resolution imageries in BSN Co Ltd concession area, West Kalimantan. // *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 15. – No. 1. – pp. 37–50. DOI: 10.30536/j.ijreses.2018.v15.a2683.

References

1. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Gagaeva Z.Sh. Dynamics of the ratio of phytomass and mortmass fractions in key areas of the carbon polygon in the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 135–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.13.011. (In Russ.)

2. Gunya A. N., Petrushina M. N., Gayrabekov U. T., Makhmudova L. S. The current state of landscapes of reference sites of the carbon landfill of the Chechen Republic. Rational nature management: traditions and innovations: Materials of the III International Conference. Moscow, MSU. 2022. pp. 170–174. (In Russ.)

3. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Geophysical research at the carbon site of the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. (In Russ.)

4. Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Menyailo O.V., Verkhovets S.V., Tychkov I.I., Urban A.V., Rubtsov A.V., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A. The influence of climatic factors on the emission of CO₂ from soils in the middle taiga forests of central Siberia: emission as a function of temperature and soil moisture. *Ecology*. 2020. No. 1. pp. 51–61. DOI: 10.31857/S0367059720010060. (In Russ.)

5. Chen J., Fan W., Li D. et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration. *Applied Energy*. 2020. Vol. 267. pp. 114914. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114914.
6. Heinsch F., Reeves M., Votava P., Kang S., Milesi C., Nemani R. User's guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Version 2.0. 2003. pp. 1–57.
7. Gelybó Gy., Barcza Z., Kern A., Kljun N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013. Vol. 174–175. pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003.
8. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. No. 4. pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
9. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*. 2017. Vol. 174. pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
10. Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Journal of Tropical Ecology*. 1967. No. 17. pp. 70–87. DOI: 10.18960/seitai.17.2_70.
11. Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T. et al. Estimating carbon dioxide exchange rates at contrasting northern peatlands using MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 137. pp. 234–243. DOI: 10.1016/j.rse.2013.06.014.
12. Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. 2007. Vol. 363. pp. 815–830. DOI: 10.1098/rstb.2007.2185.
13. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015. Vol. 519. No. 7542. pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
14. Lv Z, Shi Y, Zang S, Sun L. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO₂ Concentration in China and Its Influencing Factors. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. No. 3. pp. 231. DOI: 10.3390/atmos11030231.
15. Marelign M.A., Mekonen D.T. Estimating and mapping woodland biomass and carbon using Landsat 8 vegetation index: A case study in Dirmaga Watershed, Ethiopia. *Computational Ecology and Software*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 67–79.
16. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration to vegetation and climate. *Tellus B: Biometeorological and Physical Meteorology*. 1992. Vol. 44. No. 2. pp. 81–99. DOI: 10.3402/tellusb.v44i2.15428
17. Rouse J.W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. 1974. No. 1. pp. 48–62.
18. Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO₂ exchange from MODIS time series data. *Remote Sensing Environment*. 2010. Vol. 114. No. 6. pp. 1178–1189. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.005.
19. Tang J., Luysaert S., Richardson A. D., Kutsch W., Janssens I. A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. No. 24. pp. 8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.1320761111.
20. Wani A.A., Bhat A.F., Gatoo A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2021. Vol. 26. No. 1. pp. 1–22. DOI: 10.1007/s11027-021-09937-6.
21. Yusandi S., Jaya I.N.S., Mulia F. Biomass estimation model for mangrove forest using medium-resolution imageries in BSN Co Ltd concession area, West Kalimantan. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*. 2018. Vol. 15. No. 1. pp. 37–50. DOI: 10.30536/ijreses.2018.v15.a2683.