

Анализ закономерностей поглощения углерода горно-лесными, горно-степными и степными ландшафтами России на основе спутниковых данных и метеорологических наблюдений

© 2024. К. В. Мячина^{1,2}, д. г. н., в. н. с., Р. В. Ряхов², н. с.,
А. Н. Щавелев², м. н. с., Р. М. Безбородникова², к. э. н., м. н. с.,
С. А. Дубровская^{1,2}, к. г. н., с. н. с.,

¹ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова,
364905, Россия, г. Грозный, пр. Х. А. Исаева, д. 100,

²Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН,
460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11,
e-mail: mavicsen@gmail.com

Цель исследования – оценить возможности и закономерности поглощения углерода наземной растительностью горно-лесных, горно-степных и степных ландшафтов России. Исследования выполнялись на семи ключевых участках в Республике Чечня и Оренбургской области. На первом этапе рассчитывались показатели поглощения чистого углерода растительностью (чистая первичная продуктивность в пересчёте на углерод) за 2000–2020 гг. на основе продуктов MOD17A3, позволяющих оценить валовую первичную продуктивность и чистую первичную продуктивность наземной фитомассы. На втором этапе на основе регрессионного моделирования выявлялись закономерности формирования способности к улавливанию чистого углерода растительным покровом каждого ключевого участка в зависимости от климато-метеорологических условий. Обнаружено, что предгорный участок с многолетним смешанным лесом и отсутствием антропогенной нагрузки демонстрирует максимальную способность к улавливанию углерода из атмосферы – от 2,6 до 3,5 кгС/м²/год. Участок естественной многолетней сухой степи характеризуется минимальной способностью к улавливанию углерода – от 0,5 до 1,5 кгС/м²/год. Созданы регрессионные модели зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, демонстрирующие относительную стабильность способности многолетнего естественного растительного покрова поглощать углерод из атмосферы.

Ключевые слова: углерод, поглощение растительностью, спутниковые данные, климато-метеорологические характеристики, функциональная зависимость, регрессионная модель, горно-лесные и степные ландшафты России.

Analysis of the carbon sequestration patterns by mountain-forest, mountain-steppe and steppe landscapes of Russia based on satellite data and meteorological observations

© 2024. K. V. Myachina^{1,2}, ORCID: 0000-0001-5190-1421, R. V. Ryakhov², ORCID: 0000-0002-4762-3286,
A. N. Shchhavelev², ORCID: 0000-0002-7249-2193, R. M. Bezborodnikova², ORCID: 0000-0002-7787-6188,
S. A. Dubrovskaya^{1,2}, ORCID: 0000-0002-1361-6942,

¹Grozny State Oil Technical University,
100, H. A. Isaeva pr., Grozny, Russia, 364051,

²Institute of Steppe Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
11, Pionerskaya St., Orenburg, Russia, 460000,
e-mail: mavicsen@gmail.com

The parameters of vegetation cover – a tool for capturing carbon from the atmosphere – vary widely depending on the latitudinal-zonal conditions of the area and local microclimate features. In this regard, the most promising approach to assessing the carbon balance of the territory is the analysis of net primary productivity and, accordingly, the possibilities of capturing carbon from the atmosphere by landscapes of various natural zones, differing in the types of vegetation cover, soil, microclimate and other landscape-ecological characteristics. The aim of the study is to assess the possibilities and patterns of carbon sequestration by vegetation of mountain-forest, mountain-steppe and steppe landscapes of Russia. The research was carried out at seven study plots in the Chechnya Republic and the Orenburg region. At the first stage, the indicators of net carbon sequestration by vegetation for 2000–2020 were calculated on the basis of MOD17A3 prod-

ucts that allow estimating gross primary productivity and net primary productivity. At the second stage, the regularities of the formation of the ability to capture carbon by the vegetation cover of each study plot, depending on climatic and meteorological conditions, on the basis of regression modeling were revealed. It was found that the foothill plot with a multi-year mixed forest and the absence of anthropogenic impact demonstrates the maximum ability to capture carbon from the atmosphere – from 2.6 to 3.5 kg/m²/year. The plot of a natural perennial dry steppe is characterized by a minimum carbon capture capacity – from 0.5 to 1.5 kgF/m²/year. Regression models of the dependence of the sequestration carbon indicators on climatic and meteorological characteristics have been created. These models demonstrate the relative stability of the ability of long-term natural vegetation cover to absorb carbon from the atmosphere.

Keywords: carbon sequestration by vegetation, climatic and meteorological characteristics, functional dependence, regression model, satellite data, mountain-forest and steppe landscapes of Russia.

В последние десятилетия в странах и регионах мира наблюдается увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу как закономерная плата за стремительный экономический рост. Соответственно, на первый план выходят проблемы и стратегии стабилизации содержания основных парниковых газов в экосистеме для снижения рисков глобальных климатических изменений [1–5]. Первыми в ряду парниковых газов, усиливающих эффект температурных трансформаций в окружающей среде, стоят диоксид углерода CO₂ и метан CH₄. Выделяют три основных подхода к снижению выбросов и концентрации CO₂ в атмосфере: 1) сокращение глобального энергопотребления, 2) разработка топлива с низким или нулевым содержанием углерода, 3) целенаправленная секвестрация CO₂ из точечных источников или атмосферы естественными и инженерными методами [6]. На данный момент именно естественные методы – поглощение наземной фитомассой экосистем – играют ключевую роль в улавливании углерода. По некоторым оценкам, растительный покров поглощает 44,4–66,3 Пг CO₂ / год [7, 8]. По мнению специалистов Всемирного центра мониторинга и охраны природы Программы ООН по окружающей среде (UNEP-WCMC), поглощение диоксида углерода наземной фитомассой, возможно, является единственным устойчивым способом регулирования и сокращения атмосферного CO₂; при этом до 89% углерода, поглощаемого растениями, переходит в состав почвы [9]. Информация о параметрах фитомассы позволяет оценить запасы углерода, а мониторинг изменения её состояния на территориях различного географического масштаба напрямую связан с мониторингом изменений углеродного баланса. Признанными инструментами для получения информации о состоянии растительного покрова – наземной фитомассы являются спектральные индексы, рассчитываемые по данным дистанционного зондирования Земли [10, 11]. При помощи спутниковых спектрометров обеспечи-

ваются последовательные и систематические наблюдения за растительностью, позволяющие, в том числе, выполнить оценку двух показателей: 1) валовой первичной продуктивности (Gross Primary Productivity, GPP) – начальной общей продукции, созданной в результате фотосинтеза, 2) чистой первичной продуктивности (Net Primary Productivity, NPP) – чистого органического вещества, созданного в единицу времени и на единицу площади, за вычетом автотрофного дыхания растений [12–15]. Оценка NPP с помощью спутниковых данных базируется на том, что NPP напрямую связана с поглощённой солнечной энергией, которая, в свою очередь, коррелирует с растительными спектральными индексами [16–18]. Зная величину NPP и долю содержания углерода в сухом веществе фитомассы, можно рассчитать объём чистого поглощённого углерода.

Основными факторами, влияющими на показатели GPP и, следовательно, NPP, являются климато-метеорологические характеристики территории. Параметры растительного покрова – инструмента улавливания углерода из атмосферы – широко варьируются в зависимости от широтно-зональных условий местности и локальных особенностей микроклимата. В данном контексте наиболее перспективным подходом видится анализ чистой первичной продуктивности и, соответственно, возможностей улавливания углерода из атмосферы ландшафтами различных природных зон, отличающихся типами растительного покрова, почвы, микроклимата и иных ландшафтно-экологических характеристик.

Целью работы была оценка возможности поглощения углерода наземной растительностью на ключевых участках, выявление пространственно-временной вариации улавливающей способности растительного покрова в регионах исследования, представление набора регрессионных моделей зависимости поглощения углерода из атмосферы от внешних условий на участках лесостепных, степных и горных ландшафтов.

Объекты и методы исследования

Участки исследования. Исследования выполняли на семи ключевых участках, выделенных в Чеченской Республике и Оренбургской области России (рис. 1, табл. 1). Первые шесть участков в Чеченской Республике являются частью инфраструктуры для исследования баланса климатически активных газов. Седьмой участок входит в сеть особо охраняемых природных территорий Оренбургской области.

Как видно в таблице 1, участки исследования отличаются разнообразием горных, лесостепных и степных ландшафтов на различных почвах, условиями увлажнения, вариациями антропогенной нагрузки.

Методы и этапы исследования. Исследование выполнялось в два этапа.

1. Рассчитывали показатель поглощения чистого углерода растительностью (NPP^C) на ключевых участках за каждый год многолетнего периода исследования. Исходными данными для расчётов NPP^C послужили:

– ряды чистой первичной продуктивности (NPP) за период с 2000 по 2020 гг., полученные с помощью продуктов MOD17A3 (MOD17A3, лист h21v04), [19] с использованием тематического руководства [20];

– поглощение CO_2 растительностью посредством фотосинтеза позволяет зафиксировать около 1,62 г CO_2 на каждый грамм сухого вещества, а итоговое содержание углерода в сухом веществе составляет приблизительно 45% от общего показателя чистой первичной продуктивности NPP [21].

2. На основе регрессионного моделирования выявлены математические закономерности формирования объёмов поглощения чистого углерода растительным покровом в зависимости от природных условий ключевых участков исследования. Для получения входных переменных математической функции собраны массивы климато-метеорологических характеристик за 2000–2020 гг. с ближайших к ключевым участкам метеостанций. Все первичные данные обработаны для получения следующих показателей:

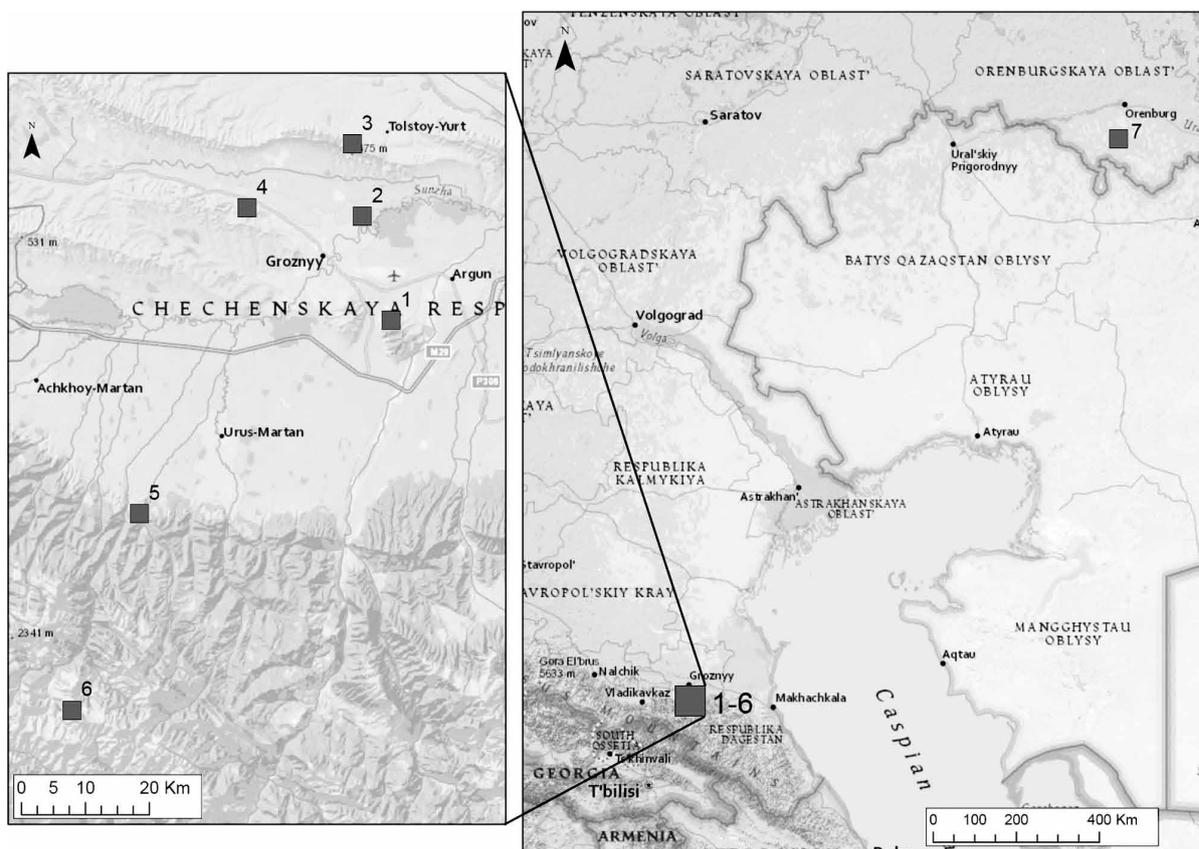


Рис. 1. Регионы и ключевые участки исследования в Республике Чечня: 1 – Ханкала, 2 – Карбоновая ферма, 3 – Толстой-Юрт, 4 – Старопромысловский, 5 – Рошни-Чу, 6 – Галанчо́ж; в Оренбургской области: 7 – Никольская степь
Fig. 1. Regions and study plots in the Chechnya Republic: 1 – Khankala, 2 – Carbon farm, 3 – Tolstoy-Yurt, 4 – Staropromyslovsky, 5 – Roshni-Chu, 6 – Galanchozh; in the Orenburg region: 7 – Nikolskaya steppe

Таблица 1 / Table 1

Краткая характеристика ключевых участков исследования / Short description of the study plots

Номер и название участка Number and name of the plot	Сред. выс. н.у.м., м Aver. alt. ab. s.l., m	Типы ландшафтов Types of landscapes	Растительность. Антропогенное воздействие Vegetation. Anthropogenic impact	Зоны увлажнения* Humidification zones*
1. Ханкала Khankala	290	Низкогорные лесостепные ландшафты Low-mountain forest-steppe landscapes	Лесо-кустарниково-разнотравная растительность. Наличие площадки исследовательского стационара Forest-shrub-mixed vegetation. Availability of a research station	1,0 – незначительно засушливая slightly dry
2. Карбоновая ферма Carbon farm	108	Сухостепные ландшафты горной долины Dry-steppe landscapes of a mountain valley	Разнотравно-кустарниковая растительность не старше 5 лет. Участок после рекультивации техногенной пустоши Mixed grass and shrubby vegetation is not older than 5 years. The plot after the reclamation of a man-made wasteland	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
3. Толстой-Юрт Tolstoy-Yurt	339	Низкогорные лесостепные ландшафты Low-mountain forest-steppe landscapes	Лесо-кустарниковая растительность на горном склоне. Имеется сеть автомобильных дорог, периодически выпасается скот Shrubby vegetation on a mountain slope. There is a network of roads, cattle are grazed periodically	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
4. Старопромысловский Staropromyslovsky	263	Естественные и залежные степи межгорной котловины Natural and fallow steppes of the intermountain basin	Разнотравно-типчаково-ковыльные, разнотравно-злаково-полынные растительные сообщества. Систематически выпасается скот Mixed-grass-type grass-grass, mixed-grass-grass-wormwood plant communities. Cattle are grazed systematically	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
5. Рошни-Чу Roshni-Chu	484	Низкогорные ландшафты горно-лесной зоны Low-mountain landscapes of the mountain-forest zone	Смешанные леса без выраженного антропогенного воздействия Mixed forests without pronounced anthropogenic impact	1,2 – обеспеченного увлажнения ensured hydration
6. Галанчожд Galanchozh	1788	Луговые степи среднегорья в приподнятой межгорной котловине Meadow steppes of the Middle mountains in an elevated intermountain basin	Разнотравье и кустарники без выраженного антропогенного воздействия Various grasses and shrubs without pronounced anthropogenic impact	1,4 – избыточного увлажнения excess moisture
7. Никольская степь Nikolskaya steppe	205	Сухостепные ландшафты сохранившейся естественной степи Dry steppe landscapes of the preserved natural steppe	Полынно-тырсово-типчаково-ковыльная растительность. Антропогенная деятельность отсутствует Polynkovo-tyrsovo-tipchakovo-kovyl'naya vegetation. There is no anthropogenic activity	< 0,6 очень засушливая very dry

Примечание: * – на основе гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова.
Note: * – based on Selyaninov's hydrothermal humidification coefficient.

- годовое количество осадков в текущем году t и прошлом году $(t-1)$,
- количество осадков в холодный период года с октября по март в году $(t-1)$,
- количество осадков в тёплый период года с апреля по сентябрь в году t ,
- среднегодовая температура воздуха в году t и $(t-1)$,
- средняя температура воздуха в холодный период года (октябрь–март) в году $(t-1)$,
- средняя температура воздуха в тёплый период года (апрель–сентябрь) в году t ,
- температура исследуемой поверхности в году t ,
- продолжительность солнечного сияния в году t .

Температуру исследуемой поверхности на участках исследования определяли по тепловым каналам изображений спутников Landsat. Зависимость объёма поглощения чистого углерода растительным покровом от климато-метеорологических характеристик местности исследовали с помощью моделей множественной регрессии в кроссплатформенном программном пакете для эконометрического анализа «gretl». Предварительно ряды входящих переменных по каждому ключевому участку проверяли на стационарность, компонентный состав и характер тренда. Выбор подходящей спецификации выходных моделей осуществляли в зависимости от того, являются ли изучаемые ряды стационарными или нет, рядами типа TS (имеют детерминированный

тренд) и/или DS (стохастический тренд) в совокупности или в отдельности.

Результаты и обсуждение

Расчитанные данные об объёмах поглощения чистого углерода растительностью (NPP^C) для каждого ключевого участка за многолетний период представлены на рисунке 2.

Максимальные значения показателя поглощения чистого углерода (в диапазоне от 2,6 до 3,5 $kgC/m^2/год$) стабильно прослеживаются на участке № 5 Рошни-Чу – единственном участке из семи, полностью покрытом смешанным лесом, расположенным в хорошо увлажняемом низкогорье Чеченской Республики.

Минимальную способность к поглощению чистого углерода демонстрирует участок № 7 Никольская степь – в диапазоне от 0,5 до 1,5 $kgC/m^2/год$. Это участок с сохранившейся естественной сухостепной растительностью в очень засушливой южной зоне Оренбургской области.

На остальных участках исследования № 1–4 и № 6, характеризующихся смешанным лесо-кустарниково-травянистым покровом, диапазон поглотительной способности колеблется от 1,1 до 2,5 $kgC/m^2/год$. К минимальным значениям диапазона тяготеет растительный покров участков № 4 Старопромысловский и № 3 Толстой-Юрт, что вполне закономерно: участок № 4 Старопромысловский, как и уча-

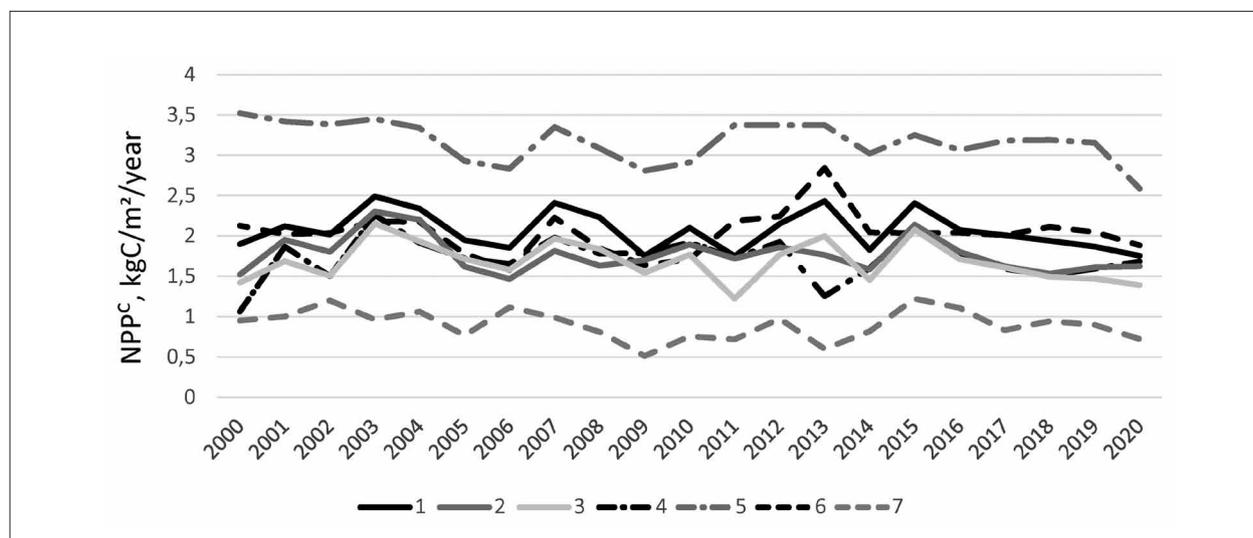


Рис. 2. Динамика значений показателя поглощения чистого углерода растительностью (NPP^C) на ключевых участках исследования: 1 – Ханкала, 2 – Карбоновая ферма, 3 – Толстой-Юрт, 4 – Старопромысловский, 5 – Рошни-Чу, 6 – Галанчожд, 7 – Никольская степь

Fig. 2. Dynamics of the index of carbon sequestration by vegetation (NPP^C) at the study plots: 1 – Khankala, 2 – Carbon farm, 3 – Tolstoy-Yurt, 4 – Staropromyslovsky, 5 – Roshni-Chu, 6 – Galanchozh, 7 – Nikolskaya steppe

Таблица 2 / Table 2

Функциональная зависимость показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик на ключевых участках исследования
Functional dependence of the net carbon sequestration index on climatic and meteorological characteristics at study plots

№ участка Plot No.	Название участка Plot name	Модель множественной регрессии* / Multiple regression model*
1	Ханкала Khankala	$NPP_t^C = 0,427 T_{sr_{t-1}} - 0,27 T_{sr_t} - 0,05 \Delta Os_{sr_t} - 0,037 \Delta T_{pov_t} + 0,027 Os_{tep_t} + 0,026 \Delta Os_{hol_t} + 0,02 \Delta Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,035) (0,039) (0,012) (0,01) (0,007) (0,003) (0,0033)</p>
2	Карбоновая ферма Carbon farm	$NPP_t^C = 0,13 T_{sr_{t-1}} - 0,046 Os_{sr_t} + 0,033 Os_{tep_t} + 0,016 \Delta Os_{hol_t} + 0,01 \Delta Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,015) (0,019) (0,013) (0,003) (0,003)</p>
3	Толстой-Юрт Tolstoy-Yurt	$NPP_t^C = -0,148 T_{sr_t} + 0,132 T_{tep_{t-1}} - 0,033 Os_{sr_t} - 0,029 T_{pov_t} + 0,017 Os_{tep_t} + 0,016 \Delta Os_{hol_{t-1}} + 0,01 Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,044) (0,026) (0,013) (0,016) (0,007) (0,003) (0,005)</p>
4	Старопромысловский Staropromyslovsky	$NPP_t^C = 0,17 T_{sr_t} - 0,14 T_{hol_t}$ <p style="text-align: center;">(0,006) (0,023)</p>
5	Рошни-Чу Roshni-Chu	$NPP_t^C = 0,25 T_{sr_{t-1}} - 0,04 \Delta T_{pov_t} + 0,01 Os_{tep_t}$ <p style="text-align: center;">(0,02) (0,01) (0,003)</p>
6	Галанчожд Galanchozh	$NPP_t^C = 0,29 T_{sr_{t-1}} - 0,14 T_{hol_t} - 0,02 Os_{hol_t} + 0,02 \Delta Os_{sr_t}$ <p style="text-align: center;">(0,03) (0,01) (0,007) (0,006)</p>
7	Никольская степь Nikolskaya steppe	$NPP_t^C = 0,086 T_{sr_t} - 0,063 T_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,03) (0,03)</p>

Примечание: * NPP_t^C – показатель чистой первичной продуктивности в году t ($кг/м^2$); Os_{sred_t} – годовое количество осадков в году t (мм); Os_{hol_t} – осадки в холодный период в году t (мм); Os_{tep_t} – осадки в тёплый период в году t (мм); T_{sr_t} – среднегодовая температура воздуха в году t ($^{\circ}$); T_{hol_t} – средняя температура воздуха в холодный период в году t ($^{\circ}$); T_{tep_t} – средняя температура воздуха в тёплый период в году t ($^{\circ}$); T_{pov_t} – средняя температура земной поверхности в году t ($^{\circ}$); $Time_{S_t}$ – продолжительность солнечного сияния в году t (ч.); Δ – абсолютные разности между уровнями временного ряда в году t и году $t-1$. Верхние числа в формулах – оценки коэффициента регрессии, а нижние (в скобках) – величина стандартной ошибки. Уровень доверительной вероятности принимался равным 95%.

Note: * NPP_t^C – the indicator of net primary productivity in the year t (kg/m^2); Os_{sred_t} – annual precipitation in the year t (mm); Os_{hol_t} – precipitation during the cold period in the year t (mm); Os_{tep_t} – precipitation during the warm period in the year t (mm); T_{sr_t} – average annual air temperature in the year t ($^{\circ}$); T_{hol_t} – average air temperature during the cold period in the year t ($^{\circ}$); T_{tep_t} – average air temperature in the warm period of the year t ($^{\circ}$); T_{pov_t} – the average temperature of the Earth's surface in the year t ($^{\circ}$); $Time_{S_t}$ – duration of sunshine in year t (h.). Δ – absolute differences between the levels of the time series in year t and year $t-1$. The upper numbers in the formulas are estimates of the regression coefficient, and the lower ones (in parentheses) are the standard error. The confidence level was assumed to be 95%.

сток № 7 Никольская степь является степным, хотя и на другой географической широте. А участок № 3 Толстой-Юрт характеризуется не интенсивной, но устойчивой антропогенной нагрузкой (дорожно-транспортная сеть и выпас скота). К максимальным значениям

диапазона стремятся показатели поглощения углерода на участках № 1 Ханкала и № 6 Галанчожд, представленные естественной луговой растительностью среднегорья (Галанчожд) и лиственным лесом низкогорья со слабым влиянием антропогенного фактора (Ханкала).

Участок № 2 Старопромысловский по показателям поглощения углерода занимает среднее положение в связи со специфической историей ландшафтного покрова: он представляет собой рекультивированную техногенную пустошь, частично озеленённую искусственно, частично зарастающую естественным образом.

Математические функции – модели множественной регрессии, описывающие закономерности формирования способности улавливать чистый углерод из атмосферы наземной фитомассой на участках исследования в зависимости от климато-метеорологических характеристик, представлены в таблице 2. Оценённые уравнения регрессии прошли проверку на статистическую значимость с использованием F-критерия Фишера-Снедекора на уровне $p < 0,05$. Переменные, не включённые в итоговую спецификацию моделей, оказались не значимыми, поэтому их влияние на изменение NPP^C представляется несущественным.

Анализ построенных регрессионных моделей позволяет выявить некоторые закономерности формирования способности наземной фитомассы ключевых участков исследования поглощать углерод. На облесённом участке № 5 Рошни-Чу значимыми характеристиками являются средняя годовая температура в предыдущем году, количество осадков в тёплый период года (с апреля по сентябрь), абсолютная разность температур поверхности за текущий и предыдущий годы: чем она больше, тем ниже показатель поглощения углерода в текущем году.

На сухостепном участке естественной степи № 7 Никольская степь значимым фактором является лишь разница среднегодовых температур текущего и предшествующего годов. Чем она выше, тем выше поглотительная способность растительного покрова.

Такой же простой моделью зависимости поглотительной способности наземной фитомассы от условий среды отличается предгорно-степной участок № 4 Старопромысловский в незначительно-засушливой зоне: имеют значение лишь показатели средней температуры за год и за его холодный период.

На наиболее высотном среднегорном участке № 6 Галанчож способность смешанного растительного покрова поглощать углерод формируется в зависимости от температурных характеристик местности и объёма осадков.

Наиболее сложные функциональные зависимости поглотительной способности наземной фитомассы от климато-метеорологических

условий наблюдаются на участках № 1 Ханкала, № 2 Карбоновая ферма, № 3 Толстой-Юрт – здесь имеют значение от 5 до 7 входных параметров. Возможно, это объясняется тем, что три указанных участка являются и наиболее сложными в отношении антропогенной нагрузки, условий формирования и состава растительного покрова.

Заключение

Предгорный участок в Республике Чечня с многолетним смешанным лесом в условиях обеспеченного увлажнения и отсутствия антропогенной нагрузки демонстрирует максимальную способность к улавливанию углерода из атмосферы. Построенная регрессионная модель зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, включающая три параметра, является достаточно универсальной и позволяет осуществлять аналогичное моделирование поглощения чистого углерода на участках со схожими природно-климатическими условиями.

Участок естественной многолетней сухой степи в Оренбургской области характеризуется минимальной способностью к улавливанию углерода. Регрессионная модель зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик включает лишь два метеопараметра, демонстрируя стабильность свойств растительного покрова, и может применяться для степных участков со схожими природно-климатическими характеристиками. Стабильность характеристик степного растительного покрова в части поглощения углерода подтверждает и степной участок незначительно-засушливой зоны в Республике Чечня, для которого форма зависимости поглотительной способности от внешних условий является достаточно простой, поскольку в оценённую модель вошло небольшое количество факторов.

На наиболее высотном из исследуемых – среднегорном участке в Чеченской Республике наблюдается простая функциональная зависимость формирования показателя улавливания чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, что также свидетельствует о стабильности поглотительных свойств наземной фитомассы. Модель может использоваться для среднегорных антропогенно незатронутых участков со схожими природно-климатическими характеристиками.

Для остальных ключевых участков со смешанным растительным покровом и периодически систематическим разнородным антропогенным воздействием регрессионное моделирование показателя поглощения чистого углерода выявило его многофакторную зависимость, включающую от 5 до 7 климато-метеорологических характеристик. Наиболее целесообразно использовать такие модели на аналогичных участках при необходимости рассчитать объёмы поглощения углерода в первом приближении. Затем необходимо вводить в расчёты дополнительные независимые переменные – факторы воздействия, вносящие корректировки на локальном уровне.

Полученные результаты призваны помочь в разработке решений по оптимизации природопользования в лесостепных, степных и горных ландшафтах.

Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0002 (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).

References

- Lal R. Carbon sequestration // Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences. 2007. V. 363. P. 815–830. doi: 10.1098/rstb.2007.2185.2
- Kintisch E. New congress may be warming up to plans for capping emissions // Science. 2007. V. 315. No. 5811. Article No. 444. doi: 10.1126/science.315.5811.444
- Kluger J. Global warming: what now? Our feverish planet badly needs a cure // Time Magazine. 2007. V. 9. P. 50–109.
- Walsh B. Greenhouse airlines: traveling by jet is a dirty business. As passenger load increases, enviros look for ways to cut back the carbon // Time. 2007 [Internet resource] <https://time.com/archive/6596793/greenhouse-airlines/> (Accessed: 07.11.2024).
- Kantor G.Ya., Syrchina N.V. Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 197–207 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207
- Schrag D.P. Preparing to capture carbon // Science. 2007. V. 315. P. 812–813. doi: 10.1126/science.1137632
- Cramer W., Kicklighter D.W., Bondeau A., Iii B.M., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A.L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results // Global Change Biology. 1999. V. 5. No. S1. P. 1–15. doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x
- Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // Global Change Biology. 2003. V. 9. No. 2. P. 161–185. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x
- Eze S., Palmer S.M., Chapman P.J. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands // Geoderma. 2018. V. 314. P. 175–183. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.11.017
- Rahmayanti M.A., Jauhari A., Fitriani A. Estimasi stok karbon dan serapan CO₂ di area revegetasi pit mangkalapi pt arutmin indonesia tambang batulicin // Jurnal Sylva Scientiae. 2021. V. 4. No. 5. P. 902–909 (in Indonesian). doi: 10.20527/jss.v4i5.4213
- Koller M., Upadhyaya S.K. Relationship between modified normalized difference vegetation index and leaf area index for processing tomatoes // Applied Engineering in Agriculture. 2005. V. 21. No. 5. P. 927–933. doi: 10.13031/2013.19696
- Xiao X., Hollinger D., Aber J., Goltz M., Davidson E. A., Zhang Q., Moore B., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. No. 4. P. 519–534. doi: 10.1016/j.rse.2003.11.008
- 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. V. 174–175. P. 43–53. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003
- Ren H., Shang Y., Zhang S. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation // Ecological Indicators. 2020. V. 112. Article No. 106108. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106108
- Junttila S., Kelly J., Kljun N., Aurela M., Klemmedtsson L., Lohila A., Nilsson M.B., Rinne J., Tuittila E.-S., Vestin P., Weslien P., Eklundh L. Upscaling Northern Peatland CO₂ fluxes using satellite remote sensing data // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 4. Article No. 818. doi: 10.3390/rs13040818
- Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T., Fernandes R., Sonntag O. Estimating carbon dioxide exchange rates at contrasting northern peatlands using MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 137. P. 234–243. doi: 10.1016/j.rse.2013.06.014
- Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO₂ exchange from MODIS time series data // Remote Sensing Environment. 2010. V. 114. No. 6. P. 1178–1189. doi: 10.1016/j.rse.2010.01.005

18. Chen J., Fan W., Li D., Liu X., Song M. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration // *Applied Energy*. 2020. V. 267. Article No. 114914. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114914

19. Database of NASA's Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // The United States Geological Survey. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center [Internet recourse] e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD17A3HGF.061/ (Accessed: 22.03.2023).

20. Running S., Mu Q. University of Montana, Maosheng Zhao – University of Maryland and MODAPS SIPS – NASA. MOD17A3 MODIS/Terra Gross Primary Productivity Yearly L4 Global 1km SIN Grid. NASA LP DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD17A3.006

21. Chen J., Gao M., Cheng S., Hou W., Song M., Liu X., Liu Y., Shan Y. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997–2017 // *Scientific Data*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 391. doi: 10.1038/s41597-020-00736-3