

DOI 10.22363/2313-2310-2021-29-4-315-327

УДК 502/504

Научная статья / Research article

Изучение воздействия растительности наземных экосистем на снижение углеродного следа на территории Российской Федерации

М.А. Пашкевич , А.Э. Коротаева ✉*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*✉ s205056@stud.spmi.ru

Аннотация. Изучаются растительные сообщества наземных экосистем Российской Федерации с точки зрения их способности уменьшать углеродный след в результате секвестрации углекислого газа. Приводится классификация типовых растительных сообществ и деление территории в зависимости от природно-климатических и региональных характеристик с дальнейшим предоставлением значений удельной поглощающей способности произрастающих растительных сообществ соответственно представленному делению. С целью осуществления оценки биомассы растительности, а также динамики ее изменения проведен анализ метода дистанционного зондирования как наиболее предпочтительного для определения биомассы в режиме реального времени. Дана характеристика используемых в настоящее время систем дистанционного зондирования, в том числе IKO-NOS, Quickbird, Worldview, ZY-3, SPOT, Sentinel, Landsat и MODIS. Перечислены основные показатели, применяемые для индексационной оценки биомассы растительности, с последующим прогнозированием на их основе эффективности поглощения углекислого газа растительными сообществами.

Ключевые слова: удельное поглощение, углекислый газ, поглощающая способность, дистанционный мониторинг, спектральные вегетационные индексы, оценка биомассы

История статьи: поступила в редакцию 27.11.2021; принята к публикации 04.01.2022.

Для цитирования: Пашкевич М.А., Коротаева А.Э. Изучение воздействия растительности наземных экосистем на снижение углеродного следа на территории Российской Федерации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2021. Т. 29. № 4. С. 315–327. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-4-315-327>

Studying the vegetation impact of terrestrial ecosystems on reducing the carbon footprint in in the territory of the Russian Federation

Marina A. Pashkevich , Anna E. Korotaeva  

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

 s205056@stud.spmi.ru

Abstract. Plant communities of terrestrial ecosystems of the Russian Federation are studied in terms of their ability to reduce the carbon footprint as a result of carbon dioxide sequestration. The classification of typical plant communities and the division of the territory depending on the climatic and regional characteristics is given, with further provision of values of the specific absorption capacity of growing plant communities according to the division presented. To assess the biomass of vegetation, as well as its dynamics of change, an analysis of the remote sensing method was carried out as the most preferred method for determining biomass in real time. The characteristics of currently used remote sensing systems, including IKONOS, Quickbird, Worldview, ZY-3, SPOT, Sentinel, Landsat and MODIS are given. The main indicators used for the indexation assessment of vegetation biomass are listed, with subsequent prediction based on them of the efficiency of carbon dioxide uptake by plant communities.

Keywords: specific absorption, carbon dioxide, absorption capacity, remote monitoring, spectral vegetation indexes, estimate of standing crop

Article history: received 27.11.2021; revised 04.01.2022.

For citation: Pashkevich MA, Korotaeva AE. Studying the vegetation impact of terrestrial ecosystems on reducing the carbon footprint in in the territory of the Russian Federation. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2021;29(4):315–327. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-4-315-327>

Введение

На сегодняшний день растительные сообщества являются одним из наиболее крупных естественных источников поглощения углекислого газа на планете. Рассматривая вопрос воспроизводства растительности как основного способа секвестрации углекислого газа, можно уверенно говорить об увеличении интенсивности поглощения углекислого газа при увеличении биомассы растительности [1]. Однако полномасштабные научные исследования, проводимые в этой области в последнее десятилетие, позволяют утверждать, что помимо естественной биомассы растительности на интенсивность поглощения углекислого газа из атмосферы влияет также поглощающая способность отдельных видов растительных сообществ [2]. В таком случае, говоря о принудительном увеличении интенсивности секвестрации углекислого газа растительными сообществами, можно опираться не только на увеличение проективного покрытия зеленых насаждений и прирост их биомассы, но также и на выбор определенных видов растительных сообществ, обладающих максимальной поглощающей способностью [3].

Анализ предметной области

На территории Российской Федерации произрастает более 11 000 видов сосудистых растений, насчитывается свыше 10 000 видов водорослей и около 5000 видов лишайников, которые также способны поглощать углекислый газ из атмосферы, однако в значительно меньшем количестве [4]. Рассматривать поглощающую способность каждого отдельного вида растений задача невыполнимая, да и ненужная, так как в зависимости от целого ряда территориальных, климатических и почвенных особенностей на той или иной территории произрастает широкое видовое разнообразие растений. В этой связи, оценивая поглощающую способность растительных сообществ, наиболее логичным вариантом является оценка поглощающей способности основных природных экосистем, характерных для различных климатических зон России, а не отдельных видов растений [5].

Территория Российской Федерации по широтному делению охватывает семь базовых природных зон: арктическая пустыня, тундра, тайга, зона смешанных и широколиственных лесов, степь, пустыня и субтропики. Кроме этого, из-за плавного перехода от одной области к другой выделяют три подзоны: лесотундра, лесостепь и полупустыня. Растительные сообщества, произрастающие в каждой из упомянутых природно-климатических зон, могут существенно различаться на разных территориях страны, однако у каждой зоны есть общие базовые виды растений, которые являются основой той или иной природной зоны [6].

Оценку интенсивности секвестрации углекислого газа растительными сообществами целесообразно производить лишь в тех природных зонах, где зеленые насаждения имеют существенное проективное покрытие и значительную биомассу, в результате чего на территории Российской Федерации исследования по данной тематике проводятся в основном для трех природных зон (тундра, зона смешанных и широколиственных лесов, субтропические леса [4]), а также для искусственных лесопосадок, например при лесовосстановлении на техногенно нарушенных территориях [7].

На сегодняшний день проведено достаточное количество научных исследований с целью оценки поглощающей способности растительных сообществ и целых экосистем на территории различных стран, при этом большинство ученых сходится во мнении, что наибольшей поглощающей способностью по отношению к углекислому газу обладают виды с наиболее развитой удельной массой, то есть древесные растения [8]. В работе Б.Г. Федорова и соавт. приводится удельная поглощающая способность некоторых видов древесных растений за один вегетационный период. Так, ель поглощает 6,6 т CO₂/га, осина – 7,1 т CO₂/га, береза – 8,1 т CO₂/га, сосна – 11 т CO₂/га, липа – 16,5 т CO₂/га, дуб – 29,7 т CO₂/га, тополь – 46,2 т CO₂/га [2]

В работе Б. Красуцкого приводится удельная поглощающая способность растительных сообществ в соответствии с природно-климатическими зонами. Так, в таежных лесах годовая величина улавливания углекислого газа составляет 3,8–7,4 т/га, в зоне смешанных лесов – 4,2–11,6 т/га, субтропических – 5,7–17,5 т/га [5].

Кроме этого, среди множества научных трудов российских ученых можно даже найти данные о среднем удельном поглощении CO_2 по регионам России. В лесах Урала ежегодное улавливание углекислого газа оценивается в 6,1 т $\text{CO}_2/\text{га}$, в Восточной Сибири – 5,7 т $\text{CO}_2/\text{га}$, в лесах Западной Сибири и Дальнего Востока – 4,95 т $\text{CO}_2/\text{га}$ [9].

Помимо видового разнообразия растительности на определенной территории, на интенсивность поглощения CO_2 в значительной степени влияет возраст древесной растительности. Молодые древесные растения депонируют углерод в 3–6 раз эффективнее средневозрастных и стареющих деревьев [10]. Таким образом, для корректного определения поглощающей способности растительных сообществ необходимо учитывать не только региональную специфику, но и возрастную структуру древостоев, что является достаточно сложной задачей, так как естественные насаждения чаще всего очень неоднородны по составу, возрастным группам и категориям состояния.

Кроме видового разнообразия, в основном диктуемого природно-климатическими условиями, важным фактором, влияющим на интенсивность поглощения растительными сообществами углекислого газа из атмосферы, является биомасса растительности. При этом определение биомассы растительности может осуществляться непосредственно в полевых условиях путем деструктивного отбора проб, а также неразрушающим методом дистанционного зондирования.

Дистанционное зондирование земли на сегодняшний день является наиболее предпочтительным в использовании методом, так как обеспечивает мониторинг растительности в режиме реального времени, позволяет регулярно обновлять данные о площади распространения растительных сообществ и их биомассе, а также применим для картирования неоднородности биомассы [11]. Применение спутников и беспилотных летательных аппаратов особенно актуально при получении характеристических данных растительности с больших площадей, а также труднодоступных территорий [12].

Широкое применение при изучении растительности, в том числе и лесных насаждений, приобрел дистанционный мониторинг после запуска спутника Landsat. В настоящее время мониторинг осуществляется на базе значительного числа спутниковых систем, таких как IKONOS, Quickbird, Worldview, ZY-3, SPOT, Sentinel, Landsat и MODIS [13]. В таблице представлены основные технические характеристики съемочной аппаратуры перечисленных спутниковых систем.

Несомненное преимущество дистанционного мониторинга при помощи спутниковых снимков, как уже говорилось ранее, заключается в проведении исследования на больших территориях с оценкой биомассы деревьев в глобальном масштабе [11]. Однако осуществление такого вида съемки ограничивается низкой способностью проникновения сквозь облака, а также низкой детализированностью снимков. В последние годы удалось решить проблему проникающей способности при помощи радиолокационного дистанционного зондирования. Дополнительным преимуществом этого метода является получение более подробной информации о структуре растительности. С начала XXI в. интенсивно вовлекаются не только бортовые радиолокационные, но и космические системы, такие как Terra-SAR, RADARSAT, ALOS и PALSAR [14].

**Основные технические характеристики
съёмочной аппаратуры некоторых спутниковых систем**

Название спутниковой системы	Обзорность, км	Периодичность, сут.	Пространственное разрешение, м/пикс	Спектральные характеристики
IKONOS	11	3	3,2	С, З, К, БИК
QuickBird-2	16,5	3–4	2,5	С, З, К, БИК
Worldview	17,6	2–4	0,5	ПАН
ZY-3	50	1–3	5,8	С, З, К, БИК
Spot 5	60	1–4	10	С, З, К
Sentinel	290	10	20	С, З, К, БИК
Landsat 7	185	16	60	З, К, БИК
MODIS	2300	<1	250–1000	С, З, К, БИК

Примечание. Перечень спектральных каналов съёмочной аппаратуры: С – синий; З – зеленый; К – красный; БИК – ближний инфракрасный; ПАН – панхроматический.

The main technical characteristics of the shooting equipment of some satellite systems

The name of the satellite system	Visibility, km	Frequency, days	Spatial resolution, m/pixels	Spectral characteristics
IKONOS	11	3	3.2	B, G, R, NIR
QuickBird-2	16.5	3–4	2.5	B, G, R, NIR
Worldview	17.6	2–4	0.5	PAN
ZY-3	50	1–3	5.8	B, G, R, NIR
Spot 5	60	1–4	10	B, G, R
Sentinel	290	10	20	B, G, R, NIR
Landsat 7	185	16	60	Z, K, NIR
MODIS	2300	<1	250–1000	B, G, R, NIR

Note. The list of spectral channels of the shooting equipment: B – blue; G – green; R – red; NIR – near infrared; PAN – panchromatic.

При необходимости индивидуальной оценки деревьев исследуемого лесного массива для определения вертикальной структуры леса или же размера отдельных экземпляров, что напрямую связано со значением биомассы, может быть применен метод лидарного дистанционного зондирования. С его помощью можно точно измерить плотность древостоя, высоту и плотность кроны. Технология лидарного зондирования позволяет получить 3D-информацию структуры лесного массива, а при совместном использовании с другими методами дистанционного мониторинга – увеличить точность оценки биомассы [11].

Картирование и получение прочих характеристик растительности при помощи методов дистанционного зондирования базируется на основе данных спектров отраженного излучения. Такие спектры обусловлены разным поглощением излучения различных длин волн биологическими пигментами, в частности хлорофиллом. Физиологическое состояние растительности параллельно изменяется с концентрацией пигментов в ее клетках и тканях и уровнем влагообеспеченности, поэтому эти показатели характеризуют здоровье растений [15; 16].

Для количественной оценки растительности, в частности ее наземной биомассы, полученные при дистанционном зондировании снимки обрабаты-

ваются при помощи вегетационных индексов. Вегетационные индексы представляют собой арифметические комбинации значений коэффициентов спектральной яркости в отдельных спектральных каналах аэрокосмического изображения. Данные выражения выводятся на основе эмпирических наблюдений и имеют целью увеличение информативности сигнала в отдельных каналах для исследований растительности при одновременном снижении влияния побочных факторов: атмосферы, яркости почвы, эффекта насыщения, зависимости от геометрии наблюдений [17]. На данный момент существует около 160 индексов, которые рассчитываются по широким и узким спектральным зонам в зависимости от спектральной яркости объектов. На рис. 1 представлен график зависимости спектральной яркости основных природных объектов от длины волны [11].

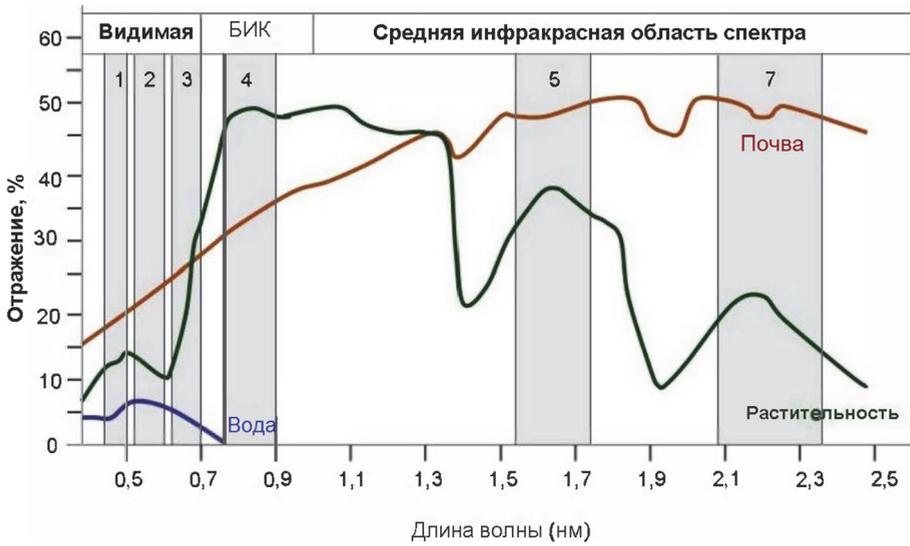


Рис. 1. Зависимость спектральной яркости основных природных объектов от длины волны

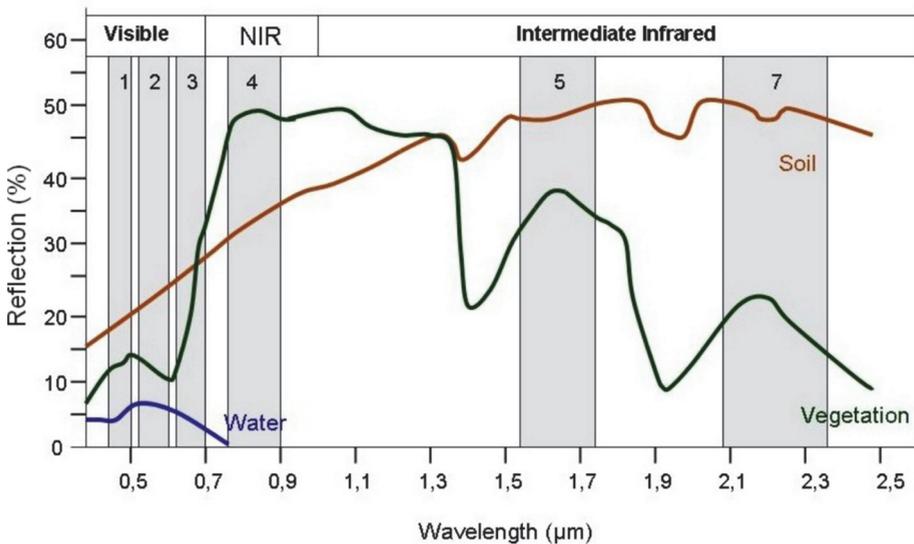


Figure 1. Dependence of the spectral brightness of the main natural objects on the wavelength

Спектральные вегетационные индексы рассчитываются по значениям наиболее стабильных участков спектра, а именно красной и ближней инфракрасной областей. Первая область (0,62–0,75 мкм) характеризуется максимумом поглощения солнечной радиации зеленым пигментом растений, а вторая (0,75–1,3 мкм) – максимальным отражением энергии [18].

Оценка состояния растительности, а также выявление территорий, занятых или свободных от насаждений, возможны при помощи индексов группы Broadband Greenness. Наиболее популярным индексом является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), позволяющий количественно оценить биомассу растений и определяющийся по формуле

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RGB – отражение в видимой области спектра.

Данный индекс принимает положительные значения для растительности, и чем оно больше, тем выше значение биомассы [15; 19]. Существует множество работ, в которых используется NDVI в качестве оценки биомассы. Данный индекс успешно применен при ее моделировании на сезонных водно-болотных, лесных и сельскохозяйственных угодьях [14].

Существует устойчивая корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем, отраженная на рис. 2 [9].

Однако чаще расчет NDVI употребляется на основе серии разновременных (разносезонных) снимков с заданным временным разрешением, позволяя получать динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные вариации, сезонные вариации, годовые вариации) [20].

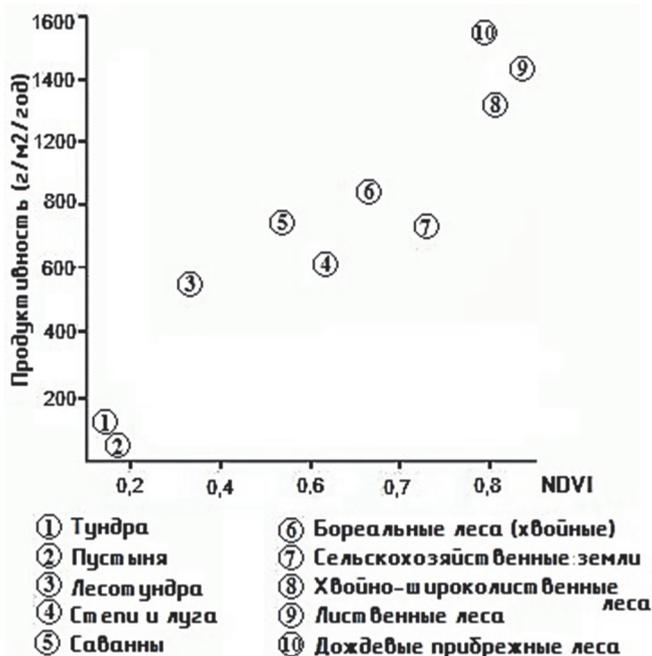


Рис. 2. Корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем

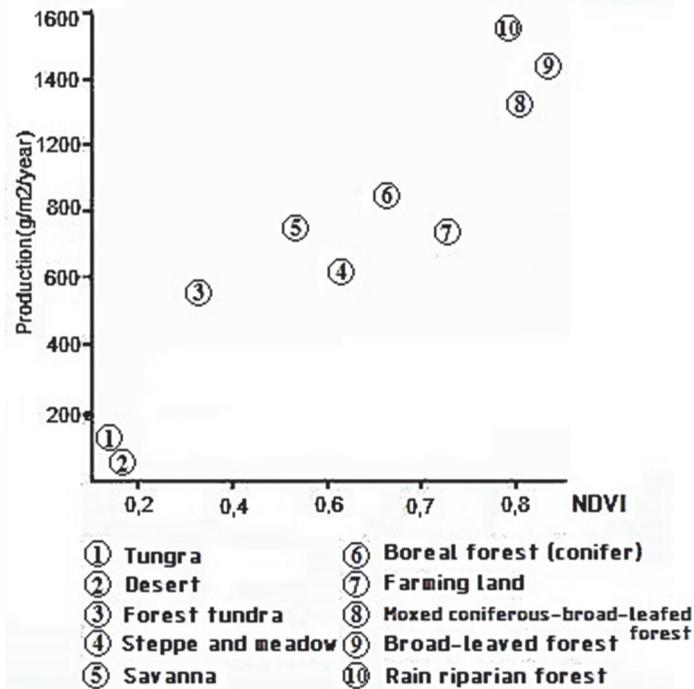


Figure 2. Correlation between NDVI and productivity for different types of ecosystems

Будучи искусственным безразмерным показателем, NDVI предназначен для измерения эколого-климатических характеристик растительности, но в то же время может показывать значительную корреляцию с некоторыми параметрами, совсем другой области: продуктивностью (временные изменения), биомассой, влажностью и минеральной (органической) насыщенностью почвы, испаряемостью (эвапотранспирацией), объемом выпадаемых осадков, мощностью и характеристиками снежного покрова и др. [21].

В некоторых случаях применение только NDVI не может дать корректную оценку полученных данных со снимков. Например, при достижении определенного порога развития растения индекс теряет чувствительность, то есть если растение развивается очень активно, то по NDVI нельзя отличить anomalно зеленое растение от «обычного» зеленого [22].

В этой связи дополнительно с интерпретированием снимков на основании вегетационного индекса NDVI при оценке снижения выбросов углерода путем восстановления сельскохозяйственных угодий часто используются четыре вегетационных индекса: RVG (Ratio Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), GCC (Green Chromatic Coordinate) и f_c (Fractional Green Vegetation Cover). Например, SAVI был выбран для уменьшения влияния почвы при интерпретировании результатов, так как не вся исследуемая территория покрыта растительностью [23].

Существуют и другие вегетационные индексы, которые, по сути, являются альтернативой индексу NDVI. Так, если нет возможности использовать для съемки камеру с инфракрасным каналом, достаточно часто используют индекс VARI (Visible Atmospheric Resistant Index) – показатель фотосинте-

тической активности, разработанный специально для работы с RGB-камерами, который определяется по формуле

$$\text{VARI} = (\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue}),$$

где Green – значения пикселей из зеленого канала; Red – значения пикселей из красного канала; Blue – значения пикселей из синего канала [24].

Безусловно, наземная биомасса зеленых насаждений характеризуется наиболее динамично меняющимся содержанием углерода. Применимость дистанционного мониторинга к определению такого типа биомассы делает возможным его использование для прогнозирования эффективности поглощения углекислого газа [10].

На сегодняшний день уже известны методы оценки поглощения углерода путем его связывания внутри лесного массива. Так, в «Руководящих принципах эффективной практики Межправительственной группы экспертов по изменению климата» подсчет эффективности поглощения углерода базируется на использовании значения биомассы лесных насаждений с последующим преобразованием этого значения в массу углерода, исходя из предположения, что в биомассе содержится 49 % углерода. В дальнейшем представляется возможным произвести пересчет результата в единицы CO₂ посредством умножения значения на 3,67, что составляет отношение атомной массы CO₂ и C соответственно [25]. Подобная методика определения уловленного углерода и углекислого газа использовалась учеными из Индии, Новой Зеландии и Южной Африки для изучения способности улавливания углекислого газа конкретными видами растений [26]. Тем не менее в работе Г.П. Аснера и соавт. по изучению лесов Амазонии отмечено, что разница между значениями, рассчитанными по данному методу и полученными при помощи воздушного лидарного зондирования, составляет более 30 %. Одной из вероятных причин этого названа неоднородность плотности углерода в лесах в различных масштабах [27].

Прогнозирование эффективности поглощения углекислого газа лесным массивом должно базироваться не только на полученном значении биомассы. Следует отметить, что протекание данного процесса зависит от климатических и временных характеристик, а также вида произрастающей растительности [28]. Один вид, произрастая в разных регионах, может демонстрировать отличающиеся между собой скорости поглощения углерода. В исследовании Б. Бернал и соавт. проанализированы 1197 точек древостоя по всему миру с целью определения коэффициента поглощения углерода в зависимости от климатических условий произрастания. В результате установлено, что темпы поглощения хвойными, дубовыми и широколиственными породами деревьев в тропических регионах характеризовались наибольшей скоростью. При этом эвкалипт показал стабильно высокий коэффициент поглощения вне зависимости от условий произрастания (рис. 3) [29]. Наряду с прогнозированием эффективности поглощения углерода можно осуществлять прогноз его выделения при анализе снимков с территорий обезлесения, деградации или уничтожения растительности.

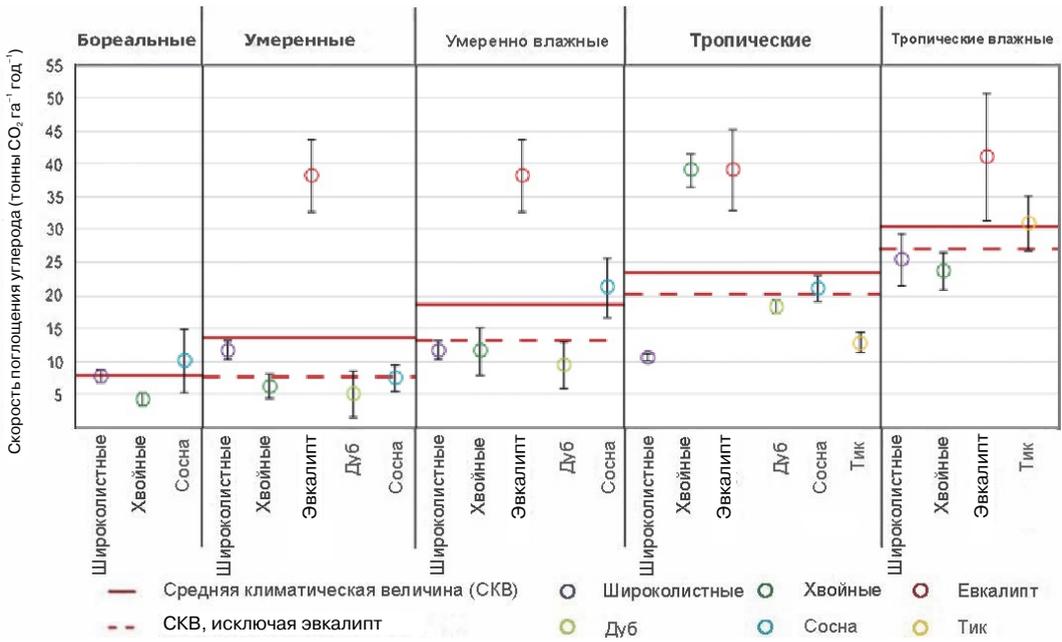


Рис. 3. Зависимость поглощения углекислого газа растительностью в различных климатических условиях

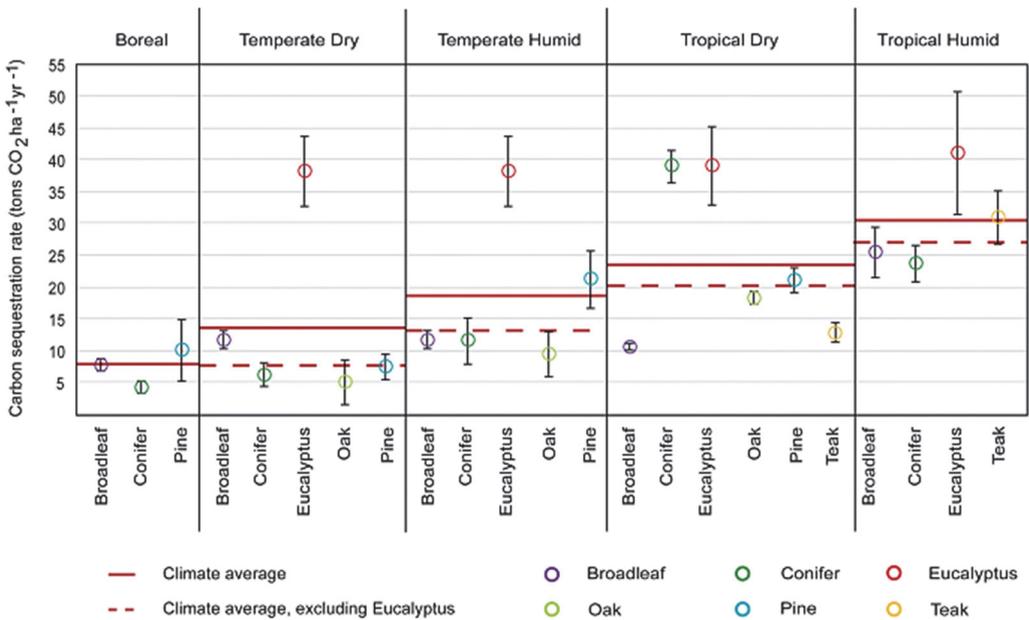


Figure 3. Dependence of carbon dioxide uptake by vegetation in different climatic conditions

При проведении дистанционного мониторинга следуют обращать внимание на возрастную структуру и схему произрастания деревьев. Существуют исследования старовозрастных деревьев с точки зрения их способности поглощать углерод. Часть из них указывают на отсутствие такой способности в связи со снижением производства биомассы и потерей деревьев из-за естественных природных нарушений, таких как удары молнии, поражение болезнями и грибами. При этом представители молодого леса характери-

зуются производством биомассы на высоком уровне в течение длительного времени, что способствует эффективному поглощению [10].

Схемы произрастания видов в лесном сообществе, а именно их плотность и пространственное расположение относительно друг друга, являются немаловажным фактором при прогнозировании поглощения. Например, в отчете Международного союза охраны природы сказано, что для связывания наибольшего количества углерода необходимо производить мозаичную посадку деревьев с использованием более низкой плотности их посадки. В этом случае будет задействована максимальная площадь земли, что обеспечивает эффективное связывание углерода на большей территории [25]. Однако в исследованиях Ю. Пан и соавт. основной причиной увеличения поглощения углерода в лесах умеренного климата наряду с существенным ростом площади лесов называется повышение плотности их посадки [28].

Заключение

Проблема снижения углеродного следа выходит на лидирующие позиции на международной арене. Все чаще поднимаются вопросы о внедрении технологий улавливания и хранения углекислого газа, особенно на территории Арктики в связи с ее хрупкой экосистемой. К настоящему времени часть стран Евросоюза предпринимает попытки уменьшения углеродного следа путем введения налогового регулирования.

Растительные сообщества занимают значительную территорию Российской Федерации, вследствие чего способны поглощать углекислый газ на большой площади. Одновременно с этим Россия характеризуется различными климатическими зонами и видами произрастающей растительности, которая имеет отличные значения удельной поглощающей способности. Поэтому для оценки растительности как инструмента секвестрации углекислого газа следует использовать методы дистанционного зондирования, которые эффективны при выделении определенных видов на больших территориях.

Список литературы / References

- [1] Di Vita G, Pilato M, Pecorino B, Brun F, D'Amico M. A Review of the role of vegetal ecosystems in CO₂ capture. *Sustain.* 2017;9:1840. <http://doi.org/10.3390/SU9101840>
- [2] Fyodorov BG, Moiseev BN, Sinyak YuV. Absorption capacity of Russian forests and carbon dioxide emissions by energy facilities. *Problemy Prognozirovaniya.* 2011; 126(3):127–42. (In Russ.)
Федоров Б.Г., Моисеев Б.Н., Сinyaк Ю.В. Поглощающая способность лесов России и выбросы углекислого газа энергетическими объектами // Проблемы прогнозирования. 2011. Т. 126. № 3. С. 127–142.
- [3] Akita N, Ohe Y. Sustainable forest management evaluation using carbon credits: from production to environmental forests. *Forests.* 2021;12(8):1–18. <http://doi.org/10.3390/f12081016>
- [4] Cherepovitsyn AE, Sidorova AE, Smirnova AE. Feasibility of using CO₂ sequestration technologies in Russia. *Neftgazovoe Delo.* 2013;(5):459–473. (In Russ.)
Череповицын А.Е., Сидорова А.Е., Смирнова Н.В. Целесообразность применения технологий секвестрации CO₂ в России // Нефтегазовое дело. 2013. № 5. С. 459–473.
- [5] Krasutsky BV. Absorption of carbon dioxide woods of Chelyabinsk region: modern ecological and economical aspects. *Tyumen State Univ. Herald Nat. Resour. Use Ecol.* 2018;4(3):57–68. <http://doi.org/10.21684/2411-7927-2018-4-3-57-68>

- [6] Koroleva NE. The main types of plant communities “Russian Svalbard.” *Trudy Karelskogo Nauchnogo Centra RAN*. 2016;(7):3–26. (In Russ.) <http://doi.org/10.17076/bg323>
 Королева Н.Е. Основные типы растительных сообществ «Русского Шпицбергена» // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 7. С. 3–26. <http://doi.org/10.17076/bg323>
- [7] Vykova MV, Alekseenko AV, Pashkevich MA, Drebenstedt C. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. *Environo. Geochem. Health*. 2021;43(6):2331–2346. <http://doi.org/10.1007/S10653-020-00802-0>
- [8] Kurbatova AI. Analytical review of modern studies of changes in the biotic components of the carbon cycle. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(4):428–438. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438>
 Курбатова А.И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 4. С. 428–438. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438>
- [9] Zamolodchikov D, Grabovskiy V, Kurc V. Managing the carbon balance of Russia’s forests: past, present and future. *Ustojchivoe Lesopol'zovanie*. 2014;2(39):23–31. (In Russ.)
 Замолодчиков Д., Грабовский В., Курц В. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. Т. 2. № 39. С. 23–31.
- [10] Mancini MS, Galli A, Niccolucci V, Lin D, Bastianoni S, Wackernagel M, Marchettini N. Ecological footprint: refining the carbon footprint calculation. *Ecol. Indic*. 2016;61:390–403. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.040>
- [11] Xu D, Wang H, Xu W, Luan Z, Xu X. LiDAR applications to estimate forest biomass at individual tree scale: opportunities, challenges and future perspectives. *Forests*. 2021;12(5):1–19. <http://doi.org/10.3390/f12050550>
- [12] Calders K, Jonckheere I, Nightingale J, Vastaranta M. Remote sensing technology applications in forestry and REDD+. *Forests*. 2020;11(2):10–13. <http://doi.org/10.3390/f11020188>
- [13] Chen L, Ren C, Zhang B, Wang Z, Xi Y. Estimation of forest above-ground biomass by geographically weighted regression and machine learning with sentinel imagery. *Forests*. 2018;9(10):1–20. <http://doi.org/10.3390/f9100582>
- [14] Kumar L, Mutanga O. Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sens*. 2017;9(9):1–8. <http://doi.org/10.3390/rs9090935>
- [15] Adamovich TA, Kantor GYa, Ashikhmina TYa, Savinykh VP. The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve “Nurgush”. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ecologiya*. 2018;(1):18–24. (In Russ.)
 Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 1. С. 18–24.
- [16] Ferwerda JG, Skidmore AK, Mutanga O. Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices across multiple plant species. *Int. J. Remote Sens*. 2005;26(18):4083–4095. <http://doi.org/10.1080/01431160500181044>
- [17] Seward A, Ashraf S, Reeves R, Bromley C. Improved environmental monitoring of surface geothermal features through comparisons of thermal infrared, satellite remote sensing and terrestrial calorimetry. *Geothermics*. 2018;73:60–73. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.01.007>
- [18] Adão T, Hruška J, Pádua L, Bessa J, Peres E, Morais R, Sousa JJ. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sens*. 2017;9(11):1110. <http://doi.org/10.3390/rs9111110>
- [19] Strizhenok AV, Ivanov AV. Ecological assessment of the current state of environmental components on the territory of the impact of cement production industry. *J. Ecol. Eng*. 2017;18(6):160–165. <http://doi.org/10.12911/22998993/76850>

- [20] Kusumaning Asri A, Lee HY, Pan WC, Tsai HJ, Chang HT, Candice Lung SC, Su HJ, Yu CP, Ji JS, Wu CD, Spengler JD. Is green space exposure beneficial in a developing country? *Landsc Urban Plan.* 2021;215:104226. <http://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2021.104226>
- [21] John J, Jaganathan R, Dharshan Shylesh DS. Mapping of Soil moisture index using optical and thermal remote sensing. *Lect. Notes Civ. Eng.* 2022;171:759–767. http://doi.org/10.1007/978-3-030-80312-4_65
- [22] Laefer DF. Harnessing remote sensing for civil engineering: then, now, and tomorrow. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2020;33:3–30.
- [23] Liu N, Harper RJ, Handcock RN, Evans B, Sochacki SJ, Dell B, Walden LL, Liu S. Seasonal timing for estimating carbon mitigation in revegetation of abandoned agricultural land with high spatial resolution remote sensing. *Remote Sens.* 2017;9(6):545. <http://doi.org/10.3390/rs9060545>
- [24] Chevrel S, Bourguignon A. Application of optical remote sensing for monitoring environmental impacts of mining: from exploitation to postmining. *L. Surf. Remote Sens. Environ. Risks.* Elsevier; 2016. p. 191–220. <http://doi.org/10.1016/B978-1-78548-105-5.50006-2>
- [25] IUCN and WRI. A guide to the Restoration Opportunities Assessment Methodology (ROAM): assessing forest landscape restoration opportunities at the national or sub-national level. Switzerland: IUCN; 2014.
- [26] Veludo G, Cunha M, Sá MM, Oliveira-Silva C. Offsetting the impact of CO₂ emissions resulting from the transport of Maiêutica's academic campus community. *Sustainability.* 2021;13:10227. <https://doi.org/10.3390/su131810227>
- [27] Asner GP, Powell GVN, Mascaro J, Knapp DE, Clark JK, Jacobson J, Kennedy-Bowdoin T, Balaji A, Paez-Acosta G, Victoria E., Secada L., Valqui M, Hughes RF. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2010;107(38):16738–16742. <http://doi.org/10.1073/pnas.1004875107>
- [28] Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais Ph, Jackson RB, Pacala SW, McGuire AD, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science.* 2011;333(6045):988–993. <http://doi.org/10.1126/science.1201609>
- [29] Bernal B, Murray LT, Pearson TRH. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance Manag.* 2018;13(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>

Сведения об авторах:

Пашкевич Мария Анатольевна, доктор технических наук, заведующая кафедрой геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет, Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2. ORCID: 0000-0001-7020-8219. E-mail: mpash@spmi.ru

Коротаева Анна Эдуардовна, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2. ORCID: 0000-0002-0211-6782. E-mail: s205056@stud.spmi.ru

Bio notes:

Marina A. Pashkevich, Dr.Sci. (Eng.), Head of the Department of Geocology, Saint Petersburg Mining University, 2 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7020-8219. E-mail: mpash@spmi.ru

Anna E. Korotaeva, postgraduate student, Saint Petersburg Mining University, 2 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0211-6782. E-mail: s205056@stud.spmi.ru