

УДК 911.2

DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-4-1-1

EDN SRDJCE

Районы потенциальной аккумуляции голубого углерода в российской Арктике, выявляемые по данным Landsat

^{1,2}**Савин И.Ю., ¹Красильников П.В., ²Прудникова Е.Ю.,
^{1,2}Жулидова Д.А., ¹Аветян С.А., ¹Цейц М.А.**

¹МГУ им. М.В. Ломоносова,

Россия, 119991, Москва, ул. Колмогорова, 1

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева,

Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2

savin_iyu@esoil.ru

Аннотация. Баланс прибрежного голубого углерода во многом определяется растительностью, процессами, протекающими в прибрежной периодически затапливаемой зоне (ПЗБЗ) и потоками вещества с суши в море в результате водной и ветровой эрозии и разрушения береговой линии. В этом свете важное значение имеет как выделение самой ПЗБЗ, так и оценка ее состояния с точки зрения присутствия растительности и потенциала развития эрозии на прилегающих почвах берегов. С использованием архива спутниковых данных *Landsat 8-9* за период с 2014 по 2024 годы проведен анализ динамики береговой линии российского сектора Северного Ледовитого океана. Выделена территория периодического затопления. Проведена оценка потенциального количества надземной фитомассы в ПЗБЗ и выявлены участки с ее отсутствием и наибольшим содержанием. Анализ смежных прибрежных почв позволил выявить участки, на которых существует высокий потенциал выноса органического вещества на прибрежную территорию в результате эрозии почв и разрушения берегов. Согласно полученным данным площадь ПЗБЗ в российском секторе Северного Ледовитого океана (без учета подобных участков в островной части региона) превышает 46 тыс. км². Всего выявлено 24 наиболее крупных зон, которые распределены по побережью достаточно равномерно. Лишь на самой восточной части побережья они отсутствуют. Учитывая потенциальное поступление углерода с прибрежных почв, было установлено, что наибольшим потенциалом аккумуляции голубого берегового углерода обладают ПЗБЗ в районе Чешской губы, устья Печеры (Баренцево море) и Оби (Карское море), Тазовской губы (Карское море) и устья Колымы (Восточно-Сибирское море). Наименьший потенциал характерен для заливов Фаддея, Терезы Клавенес (Море Лаптевых) и у острова Вайгач (Карское море). Полученные результаты послужат основой для более детального моделирования углеродного баланса береговой зоны территории исследований, а также для определения участков для постоянного мониторинга баланса голубого прибрежного углерода.

Ключевые слова: голубой углерод, *Landsat 8-9*, зона периодического затопления, Северный Ледовитый океан, вегетационный индекс *NDVI*

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке проекта «Потенциал поглощения углерода прибрежными водно-болотными угодьями при изменениях климата» в рамках Соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2024-656 от 11 сентября 2024 г.

Для цитирования: Савин И.Ю., Красильников П.В., Прудникова Е.Ю., Жулидова Д.А., Аветян С.А., Цейц М.А. 2025. Районы потенциальной аккумуляции голубого углерода в российской Арктике, выявляемые по данным *Landsat*. Региональные геосистемы, 49(4): 794–813. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-1-1 EDN: SRDJCE

Areas of Potential Blue Carbon Accumulation in the Russian Arctic Identified by Landsat Imagery

^{1,2}Igor Yu. Savin, ²Pavel V. Krasilnikov, ¹Elena Yu. Prudnikova,
^{1,2}Darya A. Zhulidova, ¹Sergey A. Avetyan, ¹Mikhail A. Tseits

¹Lomonosov Moscow State University,
1 Kolmogorov St., Moscow 119991, Russia
²V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Pyzhevsky Lane, Moscow 119017, Russia
savin_iyu@esoil.ru

Abstract. The coastal blue carbon budget is largely determined by the vegetation and processes occurring in the periodically flooded coastal zone, as well as the fluxes of matter from land to sea resulting from water and wind erosion and shoreline destruction. In this regard, it appears important to delineate the periodically flooded zone and to assess its condition in terms of the presence of vegetation and the potential for erosion on adjacent shoreline soils. Using the archive of Landsat 8-9 satellite data for the period from 2014 to 2024, we analyzed the dynamics of the coastline of the Russian sector of the Arctic Ocean. Zones that are periodically flooded were identified. We estimated the potential amount of aboveground phytomass in the periodic inundation zone and revealed the areas where the phytomass was absent and where its content was highest. The analysis of the adjacent coastal soils revealed areas with a high potential for organic matter export to the coastal zone as a result of soil erosion and shoreline destruction. According to the data obtained, the area of the periodically flooded coastal zone in the Russian sector of the Arctic Ocean (excluding a similar zone in the island part of the region) exceeds 46 thousand km². We have identified 24 largest zones that are distributed fairly evenly along the coast. The easternmost part of the coast proves to be the only area with no large zones identified. Taking into account the potential carbon input into the coastal zone from coastal soils, we have established that the zones with the greatest potential for blue coastal carbon accumulation are in the area of the Cheshskaya Bay, the mouth of the Pechora (the Barents Sea) and the Ob (the Kara Sea), the Tazovskaya Bay (the Kara Sea) and the mouth of the Kolyma (the East Siberian Sea). The lowest potential is characteristic of the Faddey Bay, the Teresa Klavene Bay (the Laptev Sea), and the area near Vaigach Island (the Kara Sea). The results obtained will serve as a basis for more detailed modeling of the carbon balance in the coastal zone of the study area, as well as for the identification of sites for continuous monitoring of the coastal blue carbon balance.

Keywords: blue carbon, Landsat 8-9, periodic inundation zone, the Arctic Ocean, NDVI

Acknowledgements: The research was carried out with the support of the project “Carbon absorption potential of coastal wetlands under climate change” within the framework of Agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2024-656 dated September 11, 2024.

For citation: Savin I.Yu., Krasilnikov P.V., Prudnikova E.Yu., Zhulidova D.A., Avetyan S.A., Tseits M.A. 2025. Areas of Potential Blue Carbon Accumulation in the Russian Arctic Identified by Landsat Imagery. Regional Geosystems, 49(4): 794–813 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-1-1 EDN: SRDJCE

Введение

Прибрежный «голубой углерод» (*blue carbon*) включает в себя запасы органического углерода, накопленные прибрежными экосистемами (мангровыми зарослями, маршами и прибрежной растительностью) [Mcleod et al., 2011]. Из-за преимущественно восстановительных условий и высокой концентрации солей в воде, в прибрежной зоне он слабо трансформируется и в гораздо большей степени накапливается по сравнению с наземными экосистемами [Chmura et al., 2003]. В результате мангровые заросли содержат вдвое больше углерода, чем вечнозеленые

леса, и почти в 10 раз больше, чем его запасы в сухих тропических лесах. Так, согласно IPCC¹ содержание углерода в метровой толще мангров в мире составляют 386 Mg/ha, маршей – 255 Mg/ha, прибрежных водорослях 108 Mg/ha. В то же время, его потери в прибрежных ландшафтах также высоки в результате береговой эрозии [Vonk et al., 2012; Couture et al., 2018]. Различия в накоплении органического углерода в почве и скоростях захоронения органических остатков приводят к различию в потенциале его депонирования прибрежных экосистем мира [Bertram et al., 2021]. Хотя важность мангровых зарослей и маршей для глобального круговорота углерода широко признается [Quevedo et al., 2021], четкое понимание всего его баланса в прибрежных экосистемах мира до сих пор отсутствует [Thomas, 2014]. В России работы по оценке запасов и динамики углерода в прибрежных экосистемах единичны [Матвеева, Лавриненко, 2011; Лавриненко, 2012; Сидорова и др., 2015; Шамрикова и др., 2019]. Также неясно, как прибрежные экосистемы будут реагировать на изменение климата, в том числе на возможное повышение уровня воды из-за таяния ледовых щитов [Lovelock, Reef, 2020].

В изучении динамики углерода как растительности, так и почвенного органического вещества маршей и мангров существуют определенные сложности, поскольку на продуктивность экосистем влияет не столько температурный режим и атмосферные осадки, сколько приливно-отливный режим. Растения и микроорганизмы реагируют на затопление и солевой стресс гораздо активнее, чем на поступление тепла и влаги. Также обычно не учитывается привнос углерода в береговые ландшафты с поверхностными и грунтовыми водами, поступающими со стороны суши, равно как и привнос углерода в береговую зону в результате эрозии. Таким образом, баланс прибрежного синего углерода во многом определяется процессами, протекающими в прибрежной периодически затапливаемой зоне и потоками вещества с суши в море в результате водной и ветровой эрозии и разрушения береговой линии [Шумовская, 2024]. В этом свете важное значение имеет как выделение самой периодически затапливаемой зоны, так и оценка ее состояния с точки зрения присутствия растительности и потенциала развития эрозии на прилегающих почвах берегов.

Спутниковые данные уже давно используются для мониторинга почв и растительности, в том числе и для оценки в них запасов углерода [Zhang et al., 2019; Elmahdy et al., 2020; Suardana et al., 2023] и для изучения мангровых экосистем [Kuenzer et al., 2011; Murray et al., 2012]. Чаще всего используют радарные спутниковые данные, которые позволяют не просто выделить ареалы мангров, но и в некоторых случаях определить структуру их растительности, что помогает оценить в ней запасы углерода [Souza-Filho et al., 2011; Nascimento et al., 2013]. С использованием спутниковых данных был создан в 2010 году «Атлас мангров Мира» [Spalding et al., 2010], а в 2011 году Giri с соавторами создали глобальную карту мангров на основе спутниковых данных *Landsat* [Giri et al., 2011]. В 2017 году с использованием спутниковых данных и наземных обследований была создана глобальная база данных соленых маршей [Mc Cowen et al., 2017], в которой представлена преимущественно точечная и локальная информация.

Несмотря на то, что уже накоплен достаточно большой опыт использования спутниковых данных для оценки состояния береговых зон, до сих пор их состояние в российской Арктике остается мало изученным. Целью наших исследований была оценка состояния надземной фитомассы береговой зоны Северных морей России с точки зрения потенциального накопления в ней углерода на основе анализа многолетнего архива спутниковых данных *Landsat*.

¹ IPCC. 2013. Coastal Wetlands. Supplement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, IPCC, 354 p.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований выступает российский сектор береговой зоны Северного Ледовитого океана (СЛО) и его изображение на спутниковых данных *Landsat*.

СЛО, как известно, является наименьшим по площади (около 15 млн. км², что составляет всего 4 % от площади мирового океана) и самым мелководным (средняя глубина 1225 м) океаном на планете. Кроме того, поверхностный слой воды в океане (25–30 м) имеет относительно невысокую соленость (28–33 ‰) и низкую температуру (−1,5 °C). Главная отличительная особенность СЛО – покрытость льдами, формирующим на полюсе сплошной льдистый покров. Общая протяженность береговой линии СЛО составляет 45 389 км, а его российских берегов – 25 565 км соответственно [Лукьянова и др., 2008].

На территории российской Арктики выделяются шесть морей, сменяющих друг друга с запада на восток: Белое, Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Климат российского побережья арктических морей чрезвычайно суров и отличается крайне низкими среднегодовыми температурами, колеблющимися в диапазоне от −4,3 °C (Белое море) до −15,4 °C (Восточно-Сибирское море), высокой штормовой (в летне-осенний период) и эоловой активностью с преобладанием восточных и северо-восточных ветровых потоков, вплоть до ураганных (более 30 м/с), чаще в зимнее время [Алексеев, 1991]. Наличие полярной ночи и чрезвычайно короткого лета (в среднем около 1,5 месяцев) создают экстремальные условия для развития растительного покрова, ограничивая биоразнообразие и накладывая отпечаток на характер функционирования биоты приморских территорий Арктики [Григорьев и др., 2006].

Несмотря на общие черты, климат арктических побережий, тем не менее, имеет существенные различия в западном и восточном секторах российской Арктики. Более благоприятным для живых организмов он является на побережье Белого и частично Баренцева морей, где преобладающие воздушные массы, поступающие с акватории Атлантического океана, смягчают температурный режим побережья, создавая относительно комфортную среду для флоры и фауны приморских территорий. Со стороны Атлантического океана в Белое и Баренцево моря поступает и приливная волна, обеспечивающая достаточно активный приливно-отливной режим с высотой приливов более 1,5 м в южной части Баренцева моря и в северо-восточной части Белого моря. Центральная и восточная прибрежная Арктика, питающаяся арктической приливной волной, в свою очередь, характеризуется низкими приливными показателями с высотой волны менее 0,5 м. В прибрежной зоне морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского основную роль в динамике развития берегов играют сгонно-нагонные явления, многократно превосходящие по силе и амплитуде колебаний приливно-отливную деятельность океана [Разумов, 2018]. Здесь суточные ритмы, присущие приливам-отливам, сменяются высокой штормовой активностью, импульверизацией в сочетании с частыми ураганными ветрами (до трех раз в месяц), разрушающими берега и выдувающими практически все живое с поверхности литорали [Лукьянова и др., 2008; Огородов, 2010]. По имеющимся данным, ежегодно в океан сносится 130–150 млн т материала, слагающего береговую полосу, что в несколько раз превышает речной сток. В том числе потери органического углерода с суши (а соответственно, и его накопление в прибрежной зоне) могут достигать 4 млн т в год [Разумов, 2010].

Как климатические параметры, так и геоморфологические признаки западного и восточного секторов российской Арктики имеют свои особенности. Если побережья Белого, Баренцева и Карского морей отличаются доминированием денудационно-абразионного рельефа с выраженным клифами, откосами, выходами скальных пород, возвышающимися над узкими пляжами, а ровные, низинные и, местами, дельтовые участки прибрежной суши распространены реже, то для береговой зоны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского отмечается преобладание лагунных и дельтовых

равнин с пологим рельефом и обширными плоскими пространствами, сложенными песчано-суглинистым материалом дельтового аллювия. Таким образом, рассматривая в комплексе влияние климатических, геоморфологических и литологических факторов на формирование ландшафтов арктического побережья, следует подчеркнуть, что, хотя более благоприятная природная среда с геоморфолого-субстратной точки зрения характерна для его восточного сектора, роль климата здесь, несомненно, является ведущей и определяющей значительную долю abiогенной составляющей на побережьях восточных арктических морей. Возникает своего рода парадоксальная ситуация, при которой потенциально более плодородные равнинно-дельтовые территории эстуариев и лагун востока береговой Арктики вследствие суровости климатической обстановки многократно уступают по своей биологической продуктивности аналогичным участкам на западе рассматриваемого региона, зачастую представляя собой бесплодные солончаковые пустоши, в той или иной мере заполненные водой. Распространение маршей в такого рода ландшафтах на побережьях морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского, в этой связи, существенно ограничено [Sergienko, 2013]. Возможно, в том числе, и по этой причине степень изученности побережья падает с запада на восток, а исследовательский интерес сосредоточен в основном на природных объектах береговой линии Белого и Баренцева морей, где, в свою очередь, приливная деятельность океана, как уже отмечалось, наиболее выражена.

С запада на восток на российском арктическом побережье отмечается выраженное уменьшение доли аккумулятивных пространств, занятых маршрутами. Помимо этого, растительность самих маршей становится все более изреженной, исчезает ее многоуровненность, обедняется разнообразие с одновременной быстрой сменой в пространстве в направлении от моря (в пределах десятков метров) на тундровые сообщества. Если на побережье Белого моря марши могут занимать до 50 % аккумулятивной территории, то на берегах Баренцева моря эта цифра падает до 20 %, Карского – до 5 %, моря Лаптевых и Чукотского моря – практически до 0 % [Sergienko, 2013].

В целом же, в береговых зонах арктических морей в современных условиях преобладает денудация, а ведущими процессами, связанными с изменениями климата, являются термоабразия в сочетании с механической абразией [Арэ, 1985; Каплин и др., 1991; Васильев и др., 2007; Marachtanov, 2019].

Почвенный покров приливно-отливных территорий изучен недостаточно [Губин, Лупачев, 2023; Мартынов, 2024]. Дискуссионной является классификационная принадлежность маршевых почв. Часть исследователей предлагают выделить их в особый тип – талассосолей [Губин, Лупачев, 2023]. Другие же традиционно относят их к засоленным флювисолям [Мартынов, 2024]. В любом случае продуктивность этих почв субаквальных ландшафтов СЛО с учетом специфики арктического климата, сгонно-нагонной, штормовой и приливной динамики, а также ледовой обстановки в устьях и дельтах северных рек, крайне мала и падает с запада на восток.

Для анализа всей территории исследований были отобраны изображения, полученные со спутников *Landsat 8-9* за период июль-август (включительно) в 2014–2024 годах с облачностью меньше 25 %. Всего для анализа было отобрано 356 изображений для 22 сцен *Landsat*. В среднем на одну сцену было отобрано 12–15 изображений за разные сроки.

Каждое изображение состоит из 9 спектральных каналов съемки (*Landsat 9* в 14-битном формате, а *Landsat 8* – в 12 битном с масштабированием до 16 бит). Все каналы съемки кроме одного имеют пространственное разрешение 30 метров на местности. Изображения могут быть получены для любой точки земного шара с периодичностью раз в 16 дней. В результате того, что на орбите в настоящий момент работают оба спутника (*Landsat 8* и *Landsat 9*), потенциально с обоих из них для любой территории может быть получено изображение раз в 8 дней.

Использовался продукт *Landsat*, прошедший калибровку, геометрическую и радиометрическую коррекцию (*Level 2 Science Product (L2SP)*). Расчет *NDVI* проведен с использованием 4 и 5 каналов с диапазонами длин волн соответственно 0,630–0,680 мкм и 0,845–0,885 мкм. Также использовался продукт *QA_PIXEL*, сопровождаемый каждой сценой *Landsat*. Он является результатом оценки качества пикселей основных каналов съемки. Для оценки качества используется и информация о том, принадлежит ли пиксель к водной поверхности или к земной на момент съемки. И эта информация внесена в продукт *QA_PIXEL*. Информация получена на основе специально разработанного *Boston University Matrix Laboratory (MATLAB)* алгоритма [Qiu et al., 2019]. Именно этот продукт был использован нами для выделения периодически затапливаемой береговой зоны (ПЗБЗ) на каждой сцене, так как он получен на основе единого глобально отработанного подхода.

На основе данного продукта (*QA_PIXEL*) проводилась классификация пикселей каждой отобранной сцены на два класса: суша и вода. Для каждого пикселя за анализируемый период по всем отобранным сценам подсчитывалось количество случаев с водой и с сушей. К зоне затопления относились пиксели, у которых встречалось 2 и более случая с водой и 2 и более случая с сушей. Для таких пикселей проводилась оценка частоты затопления (менее 25 % случаев, 25–50 % случаев, 50–75 % случаев, более 75 % случаев) и строилась соответствующая карта частоты затопления ПЗБЗ.

Далее в пикселях, относящихся к зоне затопления, на основе индекса *NDVI* оценивалось наличие и состояние растительности.

Индекс *NDVI* рассчитывался стандартно для *Landsat 8-9* ($NDVI = (\text{канал 5} - \text{канал 4}) / (\text{канал 5} + \text{канал 4})$). Для каждого анализируемого пикселя определялся средний многолетний сезонный максимум *NDVI* и среднее многолетнее значение за сезон (июль–август). Затем проводилась классификация пикселей по этим двум показателям и строилась карта пересечения классов, которая затем анализировалась с позиций оценки состояния растительности и углеродного баланса. Использовались следующие шкалы классов *NDVI* (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Шкалы классов *NDVI*
Scales of *NDVI* classes

диапазон значений <i>NDVI</i>	класс сезонного максимума <i>NDVI</i>	класс сезонного среднего <i>NDVI</i>
< 0,02	10	1000
0,02–0,04	20	2000
0,04–0,06	30	3000
0,06–0,08	40	4000
0,08–0,1	50	5000
0,1–0,2	60	6000
0,2–0,3	70	7000
0,3–0,4	80	8000
0,4–0,5	90	9000
0,5–0,6	100	10000
0,6–0,7	110	11000
0,7–0,8	120	12000
0,8–0,9	130	13000
> 0,9	140	14000

Теоретически, связь вегетационного индекса и проективного покрытия зеленой растительностью и надземной фитомассой может быть не устойчива и может не проявляться с использованием узких классов градаций *NDVI* (0,02–0,04, 0,04–0,06 и т.д.). Особенно это может быть выражено именно для региона исследований, где количество зеленой фитомассы и проективное покрытие растительности обычно невелико. Несмотря на это, мы все же решили использовать такие градации для низких значений индекса, так как это не могло оказать значительного влияния на результат анализа, целью которого было выявление именно хорошо выраженных зон с высокими значениями *NDVI*.

После этого карты сезонного максимума *NDVI* и среднего значения индекса были объединены в единую карту с использованием специальной кодовой системы, в которой коды классов суммировались. Например, суммарное значение 1060 в этом подходе означает, что в данном пикселе сезонный максимум *NDVI* находится в диапазоне 0,1–0,2, а среднее значение < 0,02 (см. коды классов в табл. 1).

Таким образом была сделана попытка оценки состояния растительности в ПЗБЗ как с учетом максимального сезонного значения индекса, так и среднего значения за сезон вегетации.

Выделялись следующие базовые классы состояния растительности ПЗБЗ:

1. величина суммарного показателя менее 7000 индицировала отсутствие растительности в зоне затопления.

2. разреженная растительность без четко выраженных пиков вегетации характеризовалась кодами:

7070, 7080, 7090, 8080, 8090

3. разреженная растительность с четко выраженными пиками вегетации характеризовалась кодами:

7100, 7110, 7120, 7130, 7140, 8100, 8110, 8120, 8130, 8140

4. средняя растительность без четко выраженных пиков вегетации характеризовалась кодами:

9090, 9100, 9110, 10100, 10110, 11110

5. средняя растительность с четко выраженными пиками вегетации характеризовалась кодами:

9120, 9130, 9140, 10120, 10130, 10140, 11120, 11130, 11140

6. густая растительность на протяжении всего сезона вегетации характеризовалась кодами со значениями более 12000.

Термины «разреженная», «средняя» и «густая» растительность приняты условно для обозначения классов, по сути, выделяемых по значениям *NDVI*. Связь этого индекса с состоянием растительности давно известна и широко используется при мониторинге растительного покрова в разных регионах мира. Для территории российской Арктики надежных шкал соответствия этого индекса растительности с разной фитомассой и проективным покрытием до сих пор не разработано. Поэтому нами было принято именно такое решение.

Дополнительно с использованием Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [Единый государственный реестр..., 2014] была получена информация о преобладающих почвах для береговой зоны СЛО. Для отражения уровня содержания почвенной органики использовалось разбиение почв на классы: 1 – с высоким содержанием органического углерода (выше 4–5 %); 2 – с низким содержанием органического углерода (менее 4–5 %); 3 – с преобладанием торфяных горизонтов; 4 – с преобладанием перегнойных горизонтов почв.

Каждый класс подразделялся по гранулометрическому составу (грансоставу) на подклассы:

1 – с тяжелым грансоставом (глинистые и суглинистые)

2 – с легким грансоставом (супесчаные, песчаные и на дериватах плотных пород)

Код итогового класса почв складывался из первой цифры, отражающей уровень содержания углерода и последующей цифры, характеризующей грансостав.

Эта информация совмещалась с выделенными классами растительности и использовалась в качестве основы для оценки потенциала ПЗБЗ для депонирования синего берегового углерода с использованием экспериментального решающего правила, представленного в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Классы оценки потенциала депонирования синего берегового углерода*
Classes of blue shore carbon sequestration potential estimation*

Итоговый класс оценки прибрежных почв	Класс растительности					
	Без растительности	С разреженной растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	С разреженной растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	Со средней растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	Со средней растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	С густой растительностью
с высоким содержанием органического углерода и тяжелым грансоставом и с низким содержанием органического углерода (классы 11, 2)	1	2	3	4	5	6
с высоким содержанием органического углерода и легким грансоставом (класс 12)	2	3	4	5	6	7
с преобладанием торфяных горизонтов (класс 3)	3	4	5	6	7	8
с преобладанием перегнойных горизонтов (класс 4)	4	5	6	7	8	9

Примечание: *Чем выше значение, тем выше потенциал

Непосредственный подбор и анализ спутниковых данных, построение карт проводилось с использованием *Google Earth Engine* [Gorelick et al., 2017]. Ввиду существенного размера анализируемой территории, перед скачиванием карт участок делился на 24 части. Для анализа данных тестовых сцен и отработки методов анализа использовалась программа *ILWIS Academic v.3.3*.

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным данным, площадь ПЗБЗ в российском секторе СЛО (без учета подобной зоны в островной части региона) превышает 46 тыс. км². На рис. 1 показано размещение наиболее крупных из выявленных ПЗБЗ. Из рисунка следует, что наиболее крупные зоны распределены по побережью СЛО достаточно равномерно. Лишь на самой восточной части побережья крупных зон не выявлено.

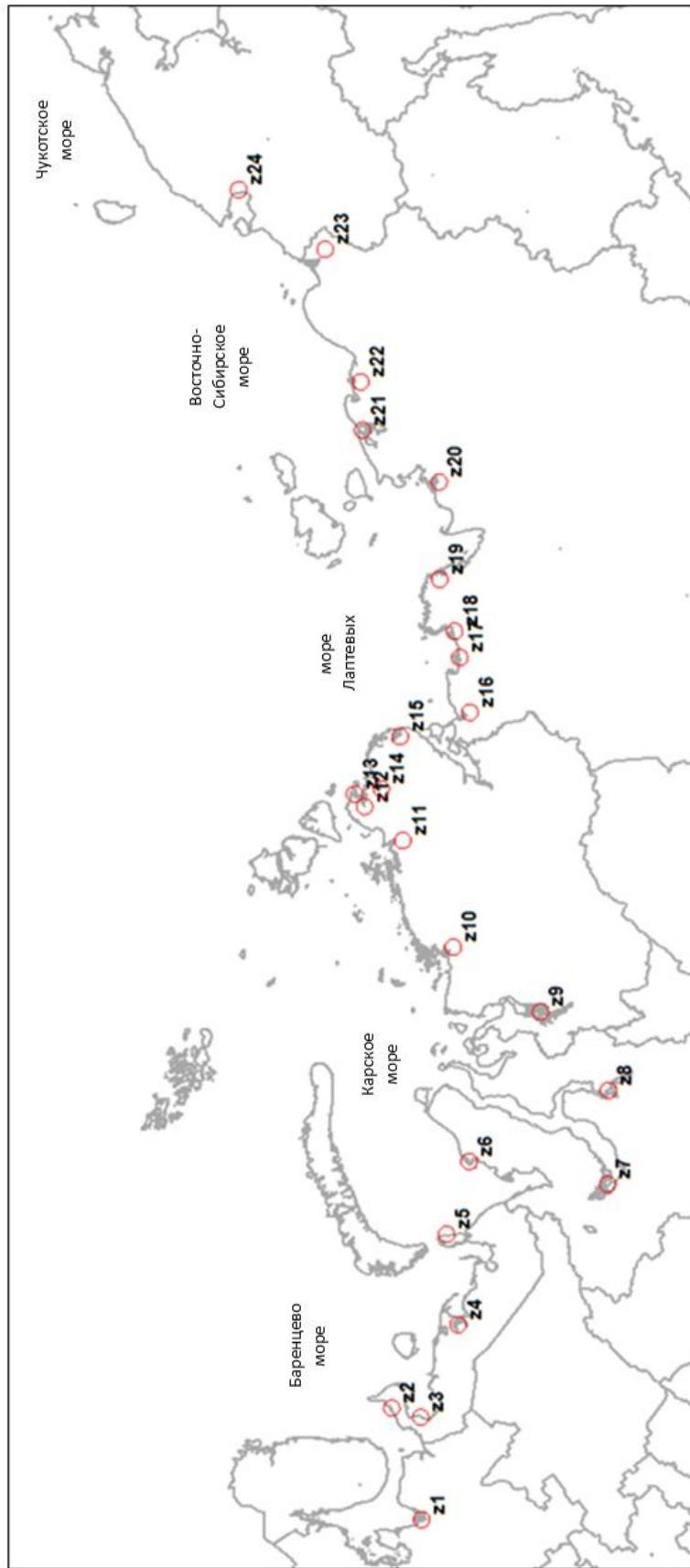


Рис.1. Размещение наиболее крупных из выявленных периодически затопляемых береговых зон (показано кодовое обозначение зон)

Fig.1. Location of the largest periodically flooded coastal zones identified (the zones are designated with codes)

Все выделенные зоны индивидуальны по особенностям растительности. В табл. 3 представлены доли разных классов в пределах каждой выделенной ПЗБЗ, которые обозначены кодами от z1 до z24 (см. рис. 1).

Таблица 3
Table 3

Доля разных классов растительности наиболее крупных периодически затопляемых береговых зон российского сектора Арктики
Proportions of various vegetation classes in the largest periodically flooded coastal zones of the Russian sector of the Arctic

Код ПЗБЗ (см. рис.1)	Без растительности	Класс растительности					Площадь, км ²
		С разреженной растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	С разреженной растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	Со средней растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	Со средней растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	С густой растительностью	
Z1	33,25	2,55	31,31	5,48	27,03	0,39	164,4
Z2	63,05	7,50	15,62	3,48	10,31	0,02	137,9
Z3	29,14	3,81	25,69	6,76	34,24	0,36	270,9
Z4	16,43	2,10	12,65	3,35	50,79	14,68	472,0
Z5	91,31	0,71	7,48	0,18	0,31	0,00	536,6
Z6	71,48	5,37	18,64	1,96	2,54	0,00	582,1
Z7	12,47	0,63	19,04	2,30	63,80	1,74	2218,8
Z8	5,67	0,06	12,61	0,24	78,12	3,28	1711,8
Z9	16,75	1,11	16,85	4,92	54,00	6,35	1429,8
Z10	20,47	1,32	28,01	9,01	41,17	0,00	1321,5
Z11	47,89	6,45	28,77	9,83	7,05	0,00	140,8
Z12	92,97	2,07	4,71	0,08	0,17	0,00	83,2
Z13	88,57	2,54	7,80	0,38	0,69	0,00	143,2
Z14	94,64	1,07	4,09	0,03	0,17	0,00	132,2
Z15	76,10	7,30	12,68	2,57	1,34	0,00	405,0
Z16	9,32	0,62	19,96	34,84	35,24	0,00	1357,8
Z17	40,51	4,36	27,57	11,02	16,53	0,00	413,3
Z18	25,37	2,32	45,67	9,09	17,56	0,00	767,4
Z19	19,07	1,02	67,28	8,48	4,13	0,00	5568,1
Z20	25,97	1,48	46,27	13,57	12,70	0,00	4210,1
Z21	29,71	0,84	54,66	5,89	8,89	0,00	1236,0
Z22	39,12	0,62	59,55	0,17	0,53	0,00	1866,4
Z23	9,64	1,45	20,77	16,04	50,26	1,83	2614,0
Z24	35,48	1,82	43,73	6,65	12,32	0,00	313,0

Из табл. 3 следует, что в пределах некоторых ПЗБЗ растительности почти не наблюдается (например, 5, 6, 12, 13, 14 зоны). В других зонах, наоборот, очень мало территорий без растительности (зоны 8, 16, 23). Эти зоны в основном приурочены к эстуариям крупных рек. ПЗБЗ с очень хорошо развитой растительностью мало. И доля хорошо развитой растительности в их пределах невелика (от 0,02 до 14,68 % от площади зоны).

Распределение разных типов береговых экосистем в ПЗБЗ российского сектора СЛО в целом подтверждает закономерности, обозначенные в описании объекта исследований, которое сделано на основе анализа литературных данных, но позволяет их существенно уточнить и представить их точную географию.

Пример карты ПЗБЗ для одного из тестовых участков представлен на рис. 2.

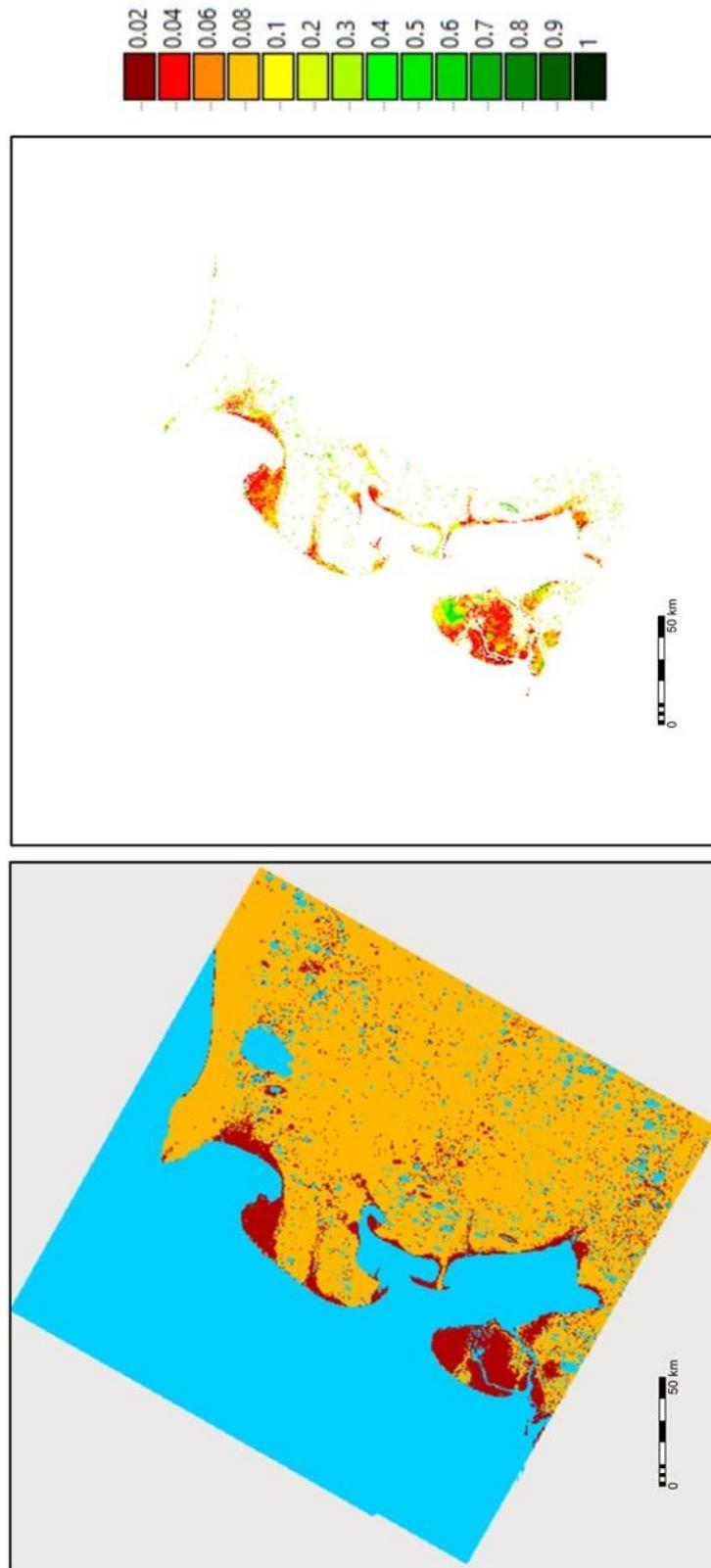


Рис.2. Пример детектирования периодически затопляемых береговых зон и состояния растительности для тестового участка «Юкагир» (юго-восточная часть моря Лаптевых)

(слева коричневым цветом показана выявленная зона периодического затопления, справа сезонные максимумы NDVI для этой зоны) (масштаб визуализации 1:1,5 млн)

Fig. 2. Example of detection of periodically flooded coastal zones and vegetation condition for the Yukagir test site (south-eastern part of the Laptev sea) (on the left, brown color shows the detected periodically flooded zone; on the right, seasonal NDVI maxima for this zone), (1:1.5 mln scale)

В целом на территории исследований преобладают ПЗБЗ с разной степенью выраженности растительного покрова. ПЗБЗ без растительности занимают около 32 % от всей выделенной зоны (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Площадь разных типов береговых экосистем в зоне периодического затопления
российского сектора Северного Ледовитого океана
Area of various coastal ecosystem types in the periodically flooded zone
of the Russian sector of the Arctic Ocean

Тип береговых экосистем	Площадь, тыс. км ²	Процент от зоны периодического затопления
Без растительности	15220,7	32,7
С разреженной растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	1211,9	2,6
С разреженной растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	16491,4	35,4
Со средней растительностью без выраженного сезонного пика вегетации	3851,4	8,3
Со средней растительностью с выраженным сезонным пиком вегетации	9443,4	20,3
С густой растительностью	336,3	0,7
ИТОГО:	46555,1	100,0

Потенциал накопления голубого берегового углерода определяется не только его содержанием в растительности и ее остатках, но может сильно зависеть и от его поступления с прибрежных территорий в результате размыва берегов и эрозии прилегающих почв.

На рис. 3 представлены классы почв береговой зоны российского сегмента СЛО согласно данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [Единый государственный реестр..., 2014]. Согласно этому источнику почвы береговой линии характеризуются разным содержанием органики, различаются граноставом и типом почвообразующих пород, что хорошо видно на рис. 3. Все это предопределяет специфику почвенного материала, который может поступать на затопляемую зону в результате ветрового переноса и эрозии почв.

Наибольшее количество дополнительного органического углерода с береговых почв с эрозией и дефляцией потенциально может поступать на территорию ПЗБЗ с почв класса 4, 3 и 12 (см. табл. 2). В табл. 5 приведены результаты оценки средневзвешенного по площади потенциала для аккумуляции голубого берегового углерода для выделенных наиболее крупных ПЗБЗ. Судя по данным таблицы, наибольшим потенциалом обладают ПЗБЗ 3 (Чешская губа), 4 (устье Печеры), 7 (устье Оби), 8 (Тазовская губа) и 23 (близ устья Колымы). Наименьший потенциал характерен для зон 14 (залив Фаддея), 12 (залив Терезы Клавенес) и 5 (у острова Вайгач) (см. рис. 1).

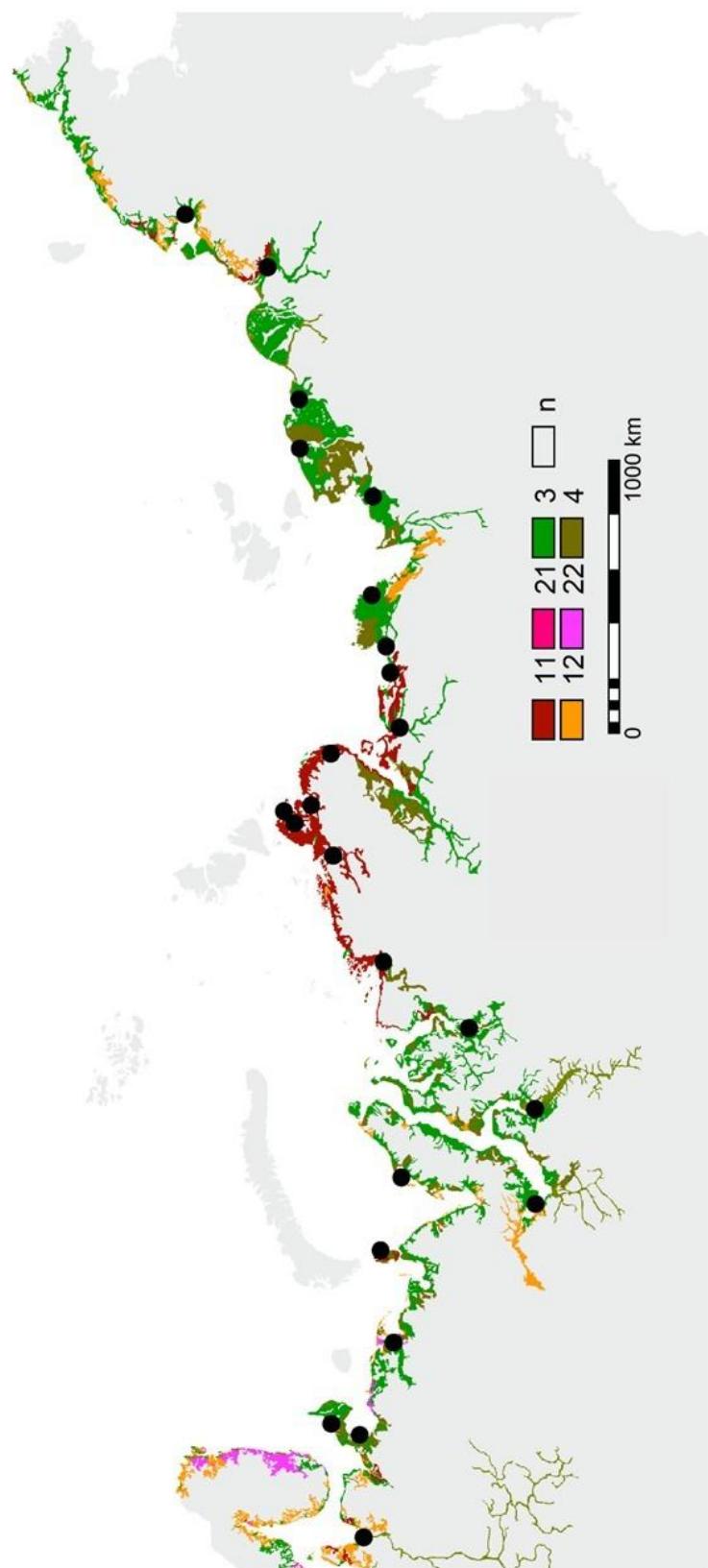


Рис.3. Классы почв береговой зоны российского сегмента Северного Ледовитого океана (расшифровка кодов легенды смотри в тексте). Чёрные точки – наиболее крупные участки периодически затопляемых береговых зон

Fig.3. Soil classes of the coastal zone of the Russian segment of the Arctic Ocean (see text for code decoding of the legend). The black dots show the largest areas of periodically flooded coastal zones

Таблица 5
Table 5

Оценка средневзвешенного по площади потенциала аккумуляции голубого берегового углерода
для выделенных наиболее крупных периодически затапляемых береговых зон

Estimated area-weighted average blue shore carbon accumulation potential
for the largest periodically flooded coastal zones identified

ПЗБЗ (см. рис.1)	Площадь, км ²	Средневзвешенный по площади потенциал аккумуляции голубого берегового углерода (балл, см. табл.1)
Z1	164,4	5,92
Z2	137,9	2,91
Z3	270,9	6,14
Z4	472,0	6,14
Z5	536,6	1,17
Z6	582,1	2,59
Z7	2218,8	6,09
Z8	1711,8	7,55
Z9	1429,8	5,97
Z10	1321,5	5,49
Z11	140,8	2,22
Z12	83,2	1,12
Z13	143,2	1,22
Z14	132,2	1,10
Z15	405,0	1,46
Z16	1357,8	5,86
Z17	413,3	2,59
Z18	767,4	4,91
Z19	5568,1	4,78
Z20	4210,1	4,86
Z21	1236,0	4,63
Z22	1866,4	4,22
Z23	2614,0	6,01
Z24	313,0	4,59

Маски периодически затапливаемой береговой зоны российского сектора Северного Ледовитого океана получены впервые. Они существенно отличаются по уровню детальности от глобальных карт [McCowen et al., 2017]. Работы подобного уровня детальности с использованием анализа спутниковых данных отечественных исследователей [Смирнов, 2015; Балдина и др., 2022; Тишков и др., 2023] локальны и охватывают лишь отдельные острова или отдельные участки территории исследований. Кроме того, в основном авторы выявляют динамику береговой линии сравнивая отдельные изображения [Смирнов, 2015; Балдина и др., 2022] или осредненные данные за отдельные периоды [Тишков и др., 2023]. В нашем случае проведен анализ практически всех имеющихся безоблачных изображений *Landsat 8-9* за последние 10 лет. При этом использованы оригинальные методы сравнения, которые позволили достигнуть поставленную цель.

Необходимо отметить и узкие места проведенных исследований. Очень короткий вегетационный сезон и высокая облачность ограничивают количество доступных для анализа сцен. Это приводит к тому, что анализ динамики часто ограничен сравнениями 10–20 изображений, что недостаточно для выявления всех особенностей динамики. Теоретически привлечение к подобному анализу данных радарной съемки [Смирнов, 2015] может быть более надежным.

На основе полученных данных оказалось практически невозможным оценить тренды затапливаемости береговой зоны. Кроме того, необходимо учитывать, что на основе спутниковых данных *Landsat* можно оценивать пространственные изменения, размеры которых как минимум превышают пиксель изображения (30 метров). Это означает, что уверенно выявляются лишь случаи изменений более чем 50–60 метров.

Также не проводилось детектирование типов растительности на территории исследований. Это было связано как с недостатком полевых данных для калибровки и верификации моделей распознавания, так и с целью исследований. В рамках достижения нашей цели было достаточно лишь оценить присутствие растительности и обобщенный объем надземной фитомассы, как индикаторов потенциального накопления в береговой зоне органического углерода. Но все выделенные зоны скорее всего индивидуальны по особенностям растительности и для более точного учета потенциала секвестрации углерода в будущем необходимо будет решать задачу распознавания типов растительности в каждой зоне.

В целом полученные данные вполне могут быть использованы как первое приближение для выделения береговых участков с высоким потенциалом секвестрации органического углерода, мониторинг которых наиболее важен в задачах моделирования и оценки баланса углерода в биосфере.

Заключение

На основе анализа спутниковых данных проведено выделение периодически затапляемой береговой зоны российского сектора Северного Ледовитого океана и ее типизация и классификация по характеру растительного покрова и почв прибрежной зоны.

Получена информация, необходимая для моделирования баланса углерода этой зоны, а также для отбора наиболее перспективных участков для организации более детального мониторинга баланса углерода прибрежных экосистем. Площадь периодически затапляемой береговой зоны в российском секторе Северного Ледовитого океана (без учета подобной зоны в островной части региона) превышает 46 тыс. км². Всего выявлено 24 наиболее крупных зон, которые распределены по побережью достаточно равномерно. Лишь на самой восточной части побережья крупных зон не установлено. В целом по территории исследований преобладают ПЗБЗ с разной степенью выраженности растительного покрова.

Учитывая потенциальное поступление углерода в береговую зону с прибрежных почв, было установлено, что наибольшим потенциалом аккумуляции голубого берегового углерода обладают зоны в районе Чешской губы, устья Печеры и Оби, Тазовской губы и устья Колымы. Наименьший потенциал характерен для заливов Фаддея, Терезы Клавенес и у острова Вайгач.

Выделенные зоны индивидуальны по особенностям растительности и почв и для более точного учета потенциала секвестрации углерода в будущем необходимо будет решать задачу распознавания типов растительности в каждой зоне.

Список литературы

- Алексеев Г.В. 1991. Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. СПб., Гидрометеоиздат, 256 с.
- Арэ Ф.Э. 1985. Основы прогноза термоабразии. Новосибирск, Наука. Сибирское отделение, 172 с.
- Васильев А.А., Остроумов В.Е., Губин С.В., Сороковиков В.А. 2007. Моделирование и прогноз термоабразии морских берегов Российской Арктики на ближайшие десятилетия. Криосфера Земли, 11(2): 60–67.
- Балдина Е.А., Ширшова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю. 2022. Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова)

- по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 1: 107–121.
- Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. 2006. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции. Криосфера Земли, 10(4): 74–94.
- Губин С.В., Лупачев А.В. 2023. Разнообразие строения и экологические функции почв побережий арктических морей. В кн.: Мерзлотные почвы в антропоцене. Всероссийская научно-практическая конференция, Салехард-Лабытнанги, 20–26 августа 2023. Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН: 10–11.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. 2014. М., Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 768 с.
- Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. 1991. Берега. М., Мысль, 479 с.
- Лавриненко И.А. 2012. Дистанционный мониторинг растительности маршей побережья Баренцева моря. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 9(2): 67–72.
- Лукьянова С.А., Сафьянов Г.А., Соловьев Г.Д., Шипилова Л.М. 2008. Типы арктических берегов России. Океанология, 48(2): 290–296.
- Мартынов С.В. 2024. Природные условия прибрежной тундры Варандея. Трансформация естественных ландшафтов при антропогенном воздействии. Арктика и инновации, 2(3): 15–53. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2024-2-3-15-53>
- Матвеева Н.В., Лавриненко О.В. 2011. Растительность маршей северо-востока Малоземельской тундры. Растительность России, 17–18: 45–69.
- Огородов С.А. 2010. Критерии стабильности (устойчивости) арктических берегов. Естественные и технические науки, 6(50): 356–358.
- Разумов С.О. 2010. Мерзлота как фактор динамики береговой зоны восточных арктических морей России. Океанология, 50(2): 285–291.
- Разумов С.О. 2018. Особенности реакции берегов восточных арктического моря России на климатические изменения. Наука и мир, 9–1(61): 70–72.
- Сидорова В.А., Святова Е.Н., Цейц М.А. 2015. Пространственное варьирование свойств маршевых почв и их влияние на растительность (Кандалакшский залив). Почвоведение, 3: 259–267. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15030119>
- Смирнов И.П. 2015. Динамика прибрежных ландшафтов на северо-востоке острова Северный архипелага Новая Земля. Известия Русского географического общества, 147(3): 30–41.
- Тишков А.А., Добрянский А.С., Кренке А.Н., Гнеденко А.Е. 2023. Изменение площади суши российской Арктики для освоения биотой. Арктика: экология и экономика, 13(2): 188–200. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-188-200>
- Шамрикова Е.В., Денева С.В., Кубик О.С. 2019. Распределение углерода и азота в почвенном покрове прибрежной территории Баренцева моря (Хайпудырская губа). Почвоведение, 5: 558–569. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030092>
- Шумовская Д.А. 2024. Разрушение берегов в морях российской Арктики. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 3: 180–187. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2024-03-6>
- Bertram C., Quaas M., Reusch T.B., Vafeidis A.T., Wolff C., Rickels W. 2021. The Blue Carbon Wealth of Nations. *Nature Climate Change*, 11(8): 704–709. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01089-4>
- Chmura G.L., Anisfeld S.C., Cahoon D.R., Lynch J.C. 2003. Global Carbon Sequestration in Tidal, Saline Wetland Soils. *Global biogeochemical cycles*, 17(4): 11. <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>
- Couture N.J., Irrgang A., Pollard W., Lantuit H., Fritz M. 2018. Coastal Erosion of Permafrost Soils Along the Yukon Coastal Plain and Fluxes of Organic Carbon to the Canadian Beaufort Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(2): 406–422. <https://doi.org/10.1002/2017JG004166>
- Elmahdy S.I., Ali T.A., Mohamed M.M., Howari F.M., Abouleish M. Simonet D. 2020. Spatiotemporal Mapping and Monitoring of Mangrove Forests Changes From 1990 to 2019 in the Northern Emirates, UAE Using Random Forest, Kernel Logistic Regression and Naive Bayes Tree Models. *Frontiers in Environmental Science*, 8: 102. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00102>
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- Kuenzer C., Bluemel A., Gebhardt S., Quoc T.V., Dech S. 2011. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sensing*, 3(5): 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Lovelock C.E., Reef R. 2020. Variable Impacts of Climate Change on Blue Carbon. *One Earth*, 3(2), 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010>
- Marachtanov V.P. 2019. Storm Erosion of Arctic Coasts Under the Combined Action of Thermal and Mechanical Factors. *Norwegian Journal of development of the international science*, 30: 21–26.
- McLeod E., Chmura G.L., Bouillon S., Salm R., Björk M., Duarte C.M., Lovelock C.E., Schlesinger W.H., Silliman B.R. 2011. A Blueprint for Blue Carbon: Toward an Improved Understanding of the Role of Vegetated Coastal Habitats in Sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10): 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Mcowen C., Weatherdon L.V., Bochove J., Sullivan E., Blyth S., Zockler C., Stanwell-Smith D., Kingston N., Martin C.S., Spalding M., Fletcher S. 2017. A Global Map of Saltmarshes (v6.1). *Biodiversity Data Journal*, 5: e11764. <https://doi.org/10.3897/BDJ.5.e11764>.
- Murray N.J., Phinn S.R., Clemens R.S., Roelfsema C.M., Fuller R.A. 2012. Continental Scale Mapping of Tidal Flats Across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 4(11): 3417–3426. <https://doi.org/10.3390/rs4113417>
- Nascimento Jr W.R., Souza-Filho P.W.M., Proisy C., Lucas R.M., Rosenqvist A. 2013. Mapping Changes in the Largest Continuous Amazonian Mangrove Belt Using Object-Based Classification of Multisensor Satellite Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 117: 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.10.005>
- Qiu S., Zhu Z., He B. 2019. Fmask 4.0: Improved Cloud and Cloud Shadow Detection in Landsats 4-8 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.024>.
- Quevedo J.M.D., Uchiyama Y., Kohsaka R. 2021. A Blue Carbon Ecosystems Qualitative Assessment Applying the DPSIR Framework: Local Perspective of Global Benefits and Contributions. *Marine Policy*, 128: 104462. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104462>
- Sergienko L.A. 2013. Salt Marsh Flora and Vegetation of the Russian Arctic Coasts. *Czech Polar Reports*, 3(1): 30–37.
- Souza-Filho P.W.M., Paradella W.R., Rodrigues S.W., Costa F.R., Mura J.C., Gonçalves F.D. 2011. Discrimination of Coastal Wetland Environments in the Amazon Region Based on Multi-Polarized L-band Airborne Synthetic Aperture Radar Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(1): 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.08.011>
- Spalding M., Kainuma M., Collins L. 2010. *World Atlas of Mangroves*. London, Routledge, 336 p.
- Giri C., Ochieng E., Tieszen L., Zhu Z., Singh A., Loveland T. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 154–159.
- Suardana A.A.M.A.P., Anggraini N., Nandika M.R., Aziz K., As-syakur A.R., Ulfa A., Wijaya A.D., Prasetyo W., Winarso G., Dewanti R. 2023. Estimation and Mapping Above-Ground Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2 Data Derived Vegetation Indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia. *Forest and Society*, 7(1): 116–134. <https://doi.org/10.24259/fs.v7i1.22062>
- Thomas S. 2014. Blue Carbon: Knowledge Gaps, Critical Issues, and Novel Approaches. *Ecological Economics*, 107: 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.07.028>
- Vonk J.E., Sánchez-García L., Van Dongen B.E. 2012. Activation of Old Carbon by Erosion of Coastal and Subsea Permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 489(7414): 137–140.
- Zhang Y., Guo L., Chen Y., Shi T., Luo M., Ju Q., Zhang H., Wang S. 2019. Prediction of Soil Organic Carbon based on Landsat 8 Monthly NDVI Data for the Jianghan Plain in Hubei Province, China. *Remote Sensing*, 11(14): 1683. <https://doi.org/10.3390/rs11141683>.

References

- Alekseyev G.V. 1991. *Klimaticheskiy rezhim Arktiki na rubezhe XX i XXI vv* [Climatic Regime of the Arctic at the Turn of the 20th and 21st Centuries]. Saint Petersburg, Pabl. Gidrometeoizdat, 256 p.
- Are F.E. 1985. *Osnovy prognoza termoabrazii* [Basics of Thermal Abrasion Forecasting]. Novosibirsk, Pabl. Nauka. Sibirskoe otdelenie, 172 p.
- Vasiliev A.A., Ostroumov V.E., Gubin S.V., Sorokovikov V.A. 2007. Modelling and Prediction of Coastal Dynamics in Russian Arctic for Next Decades. *Earth's Cryosphere*, 11(2): 60–67 (in Russian).

- Baldina E.A., Shirshova V.Yu., Romanenko F.A., Lugovoi N.N., Zhdanova E.Yu. 2022. Dynamics of Coastline and Surface Conditions of the Small Arctic Islands (Vize and Ushakova) from Multitemporal Optical and Radar Images. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 1: 107–121 (in Russian).
- Grigoriev M.N., Razumov S.O., Kunitzkiy V.V., Spektor V.B. 2006. Dynamics of the Russian East Arctic Sea Coast: Major Factors, Regularities and Tendencies. *Earth's Cryosphere*, 10(4): 74–94 (in Russian).
- Gubin S.V., Lupachev A.V. 2023. Raznoobrazziye stroyeniya i ekologicheskiye funktsii pochv poberezhiy arkticheskikh morey [Diversity of Structure and Ecological Functions of Soils on the Coasts of the Arctic Seas]. In: *Merzlotnyye pochvy v antropotsene* [Permafrost Soils in the Anthropocene]. All-Russian Scientific and Practical Conference, Salekhard-Labytnangi, 20–26 August 2023. Syktyvkar, Pabl. Komi nauchnyy tsentr UrO RAN: 10–11.
- Yedinyy gosudarstvennyy reyestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0 [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0]. 2014. Moscow, Pabl. Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 768 p.
- Kaplin P.A., Leontyev O.K., Lukyanova S.A., Nikiforov L.G. 1991. *Berega* [Shores]. Moscow, Pabl. Mysl, 479 p.
- Lavrinenko I.A. 2012. Distantionnyy monitoring rastitel'nosti marshey poberezhiya Barentseva morya [Remote Monitoring of Coastal Marsh Vegetation in the Barents Sea]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 9(2): 67–72.
- Luk'yanova S.A., Safyanov G.A., Solov'yova G.D., Shipilova L.M. 2008. Types of Arctic Coasts of Russia. *Oceanology*, 48(2): 268–274 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0001437008020148>
- Martynov S.V. 2024. Natural conditions of Varandey coastal tundra. Anthropogenic transformation of natural landscapes. *Arctic and Innovations*, 2(3): 15–53 (in Russian). <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2024-2-3-15-53>
- Matveyeva N.V., Lavrinenco O.V. 2011. Marsh Vegetation in the North-East of Malozemelskaya Tundra. *Vegetation of Russia*, 17–18: 45–69 (in Russian).
- Ogorodov S.A. 2010. Kriterii stabil'nosti (ustoychivosti) arkticheskikh beregov [Stability Criteria for the Arctic coasts]. *Natural and technical sciences*, 6(50): 356–358.
- Razumov S.O. 2010. Permafrost as a Factor of the Dynamics of the Coastal Zone of the Russian East Arctic Seas. *Oceanology*, 50(2): 285–291 (in Russian).
- Razumov S.O. 2018. Peculiarities of Reaction of Coast in the East Arctic Seas of Russia on Climatic Changes. *Science and World*, 9–1(61): 70–72 (in Russian).
- Sidorova V.A., Svyatova E.N., Tseyts M.A. 2015. Spatial Variability of the Properties of Marsh Soils and Their Impact on Vegetation. *Eurasian Soil Science*, 48(3): 223–230 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229315030114>
- Smirnov I.P. 2015. Dynamics of Coastal Landscapes in the North-East of Northern Island of Novaya Zemlya Archipelago. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 147(3): 30–41 (in Russian).
- Tishkov A.A., Dobryansky A.S., Krenke A.N., Gnedenko A.Ye. 2023. Changes in the Land Area of the Russian Arctic for the Biota Development. *Arctic: Ecology and Economy*, 13(2): 188–200 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-188-200>
- Shamrikova E.V., Deneva S.V., Kubik O.S. 2019. Spatial Patterns of Carbon and Nitrogen in Soils of the Barents Sea Coastal Area (Khaypudyrskaya Bay). *Eurasian Soil Science*, 52(5): 507–517 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229319030098>
- Shumovskaya D.A. 2024. Shore Destruction in the Sea of the Russian Arctic. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov*, 3: 180–187 (in Russian). <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2024-03-6>
- Bertram C., Quaas M., Reusch T.B., Vafeidis A.T., Wolff C., Rickels W. 2021. The Blue Carbon Wealth of Nations. *Nature Climate Change*, 11(8): 704–709. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01089-4>
- Chmura G.L., Anisfeld S.C., Cahoon D.R., Lynch J.C. 2003. Global Carbon Sequestration in Tidal, Saline Wetland Soils. *Global biogeochemical cycles*, 17(4): 11. <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>
- Couture N.J., Irrgang A., Pollard W., Lantuit H., Fritz M. 2018. Coastal Erosion of Permafrost Soils Along the Yukon Coastal Plain and Fluxes of Organic Carbon to the Canadian Beaufort Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(2): 406–422. <https://doi.org/10.1002/2017JG004166>

- Elmahdy S.I., Ali T.A., Mohamed M.M., Howari F.M., Abouleish M. Simonet D. 2020. Spatiotemporal Mapping and Monitoring of Mangrove Forests Changes From 1990 to 2019 in the Northern Emirates, UAE Using Random Forest, Kernel Logistic Regression and Naive Bayes Tree Models. *Frontiers in Environmental Science*, 8: 102. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00102>
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Kuenzer C., Bluemel A., Gebhardt S., Quoc T.V., Dech S. 2011. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sensing*, 3(5): 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Lovelock C.E., Reef R. 2020. Variable Impacts of Climate Change on Blue Carbon. *One Earth*, 3(2), 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010>
- Marachtanov V.P. 2019. Storm Erosion of Arctic Coasts Under the Combined Action of Thermal and Mechanical Factors. *Norwegian Journal of development of the international science*, 30: 21–26.
- McLeod E., Chmura G.L., Bouillon S., Salm R., Björk M., Duarte C.M., Lovelock C.E., Schlesinger W.H., Silliman B.R. 2011. A Blueprint for Blue Carbon: Toward an Improved Understanding of the Role of Vegetated Coastal Habitats in Sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10): 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Mcowen C., Weatherdon L.V., Bochove J., Sullivan E., Blyth S., Zockler C., Stanwell-Smith D., Kingston N., Martin C.S., Spalding M., Fletcher S. 2017. A Global Map of Saltmarshes (v6.1). *Biodiversity Data Journal*, 5: e11764. <https://doi.org/10.3897/BDJ.5.e11764>.
- Murray N.J., Phinn S.R., Clemens R.S., Roelfsema C.M., Fuller R.A. 2012. Continental Scale Mapping of Tidal Flats Across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 4(11): 3417–3426. <https://doi.org/10.3390/rs4113417>
- Nascimento Jr W.R., Souza-Filho P.W.M., Proisy C., Lucas R.M., Rosenqvist A. 2013. Mapping Changes in the Largest Continuous Amazonian Mangrove Belt Using Object-Based Classification of Multisensor Satellite Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 117: 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.10.005>
- Qiu S., Zhu Z., He B. 2019. Fmask 4.0: Improved Cloud and Cloud Shadow Detection in Landsats 4–8 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.024>.
- Quevedo J.M.D., Uchiyama Y., Kohsaka R. 2021. A Blue Carbon Ecosystems Qualitative Assessment Applying the DPSIR Framework: Local Perspective of Global Benefits and Contributions. *Marine Policy*, 128: 104462. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104462>
- Sergienko L.A. 2013. Salt Marsh Flora and Vegetation of the Russian Arctic Coasts. *Czech Polar Reports*, 3(1): 30–37.
- Souza-Filho P.W.M., Paradella W.R., Rodrigues S.W., Costa F.R., Mura J.C., Gonçalves F.D. 2011. Discrimination of Coastal Wetland Environments in the Amazon Region Based on Multi-Polarized L-band Airborne Synthetic Aperture Radar Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(1): 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.08.011>
- Spalding M., Kainuma M., Collins L. 2010. *World Atlas of Mangroves*. London, Routledge, 336 p.
- Giri C., Ochieng E., Tieszen L., Zhu Z., Singh A., Loveland T. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 154–159.
- Suardana A.A.M.A.P., Anggraini N., Nandika M.R., Aziz K., As-syakur A.R., Ulfa A., Wijaya A.D., Prasetio W., Winarso G., Dewanti R. 2023. Estimation and Mapping Above-Ground Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2 Data Derived Vegetation Indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia. *Forest and Society*, 7(1): 116–134. <https://doi.org/10.24259/fs.v7i1.22062>
- Thomas S. 2014. Blue Carbon: Knowledge Gaps, Critical Issues, and Novel Approaches. *Ecological Economics*, 107: 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.07.028>
- Vonk J.E., Sánchez-García L., Van Dongen B.E. 2012. Activation of Old Carbon by Erosion of Coastal and Subsea Permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 489(7414): 137–140.
- Zhang Y., Guo L., Chen Y., Shi T., Luo M., Ju Q., Zhang H., Wang S. 2019. Prediction of Soil Organic Carbon based on Landsat 8 Monthly NDVI Data for the Jianghan Plain in Hubei Province, China. *Remote Sensing*, 11(14): 1683. <https://doi.org/10.3390/rs11141683>.

Поступила в редакцию 12.09.2025;
поступила после рецензирования 05.10.2025;
принята к публикации 05.11.2025

Received September 12, 2025;
Revised October 05, 2025;
Accepted November 05, 2025

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савин Игорь Юрьевич, профессор, доктор сельскохозяйственных наук, академик Российской Академии наук, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, г. Москва, Россия

Красильников Павел Владимирович, профессор, доктор биологических наук, член-корреспондент Российской Академии наук, факультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Прудникова Елена Юрьевна, кандидат биологических наук, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, г. Москва, Россия

Жулидова Дарья Алексеевна, аспирант, факультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аветян Сергей Андреевич, кандидат биологических наук, факультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Цейц Михаил Александрович, кандидат биологических наук, факультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor Yu. Savin, Professor, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

Pavel V. Krasilnikov, Professor, Doctor of Biological Sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Department of Soil Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Elena Yu. Prudnikova, Candidate of Biological Sciences, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

Darya A. Zhulidova, postgraduate student of the Department of Soil Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Sergey A. Avetyan, Candidate of Biological Sciences, Department of Soil Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Mikhail A. Tseits, Candidate of Biological Sciences, Department of Soil Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia