

Настоящее исследование посвящено оценке запасов общего органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в деятельном слое почвы (без напочвенного покрова) и многолетнемерзлых породах с дифференциацией по физико-географическим провинциям (54 категории), основанных на мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия). Территория Якутии аккумулирует в почве и верхней кровле многолетней мерзлоты 84,9 Гт  $C_{\text{орг}}$ . Равнинные провинции (60% площади) хранят 66,3 Гт, из них на долю ледового комплекса приходится 41,5 Гт углерода. Ландшафты с ледовым комплексом (16 провинций) весьма уязвимы, содержат наибольший запас органического углерода во вмещающих породах, что может привести к высвобождению большего количества углерода при деградации и таянии подземных льдов. Горные провинции, занимающие 40% площади, содержат до 18,6 Гт  $C_{\text{орг}}$ . Распределение запасов органического углерода в многолетнемерзлых породах показывает, что в провинциях сплошного типа распространения сосредоточено 77,5, прерывистого – 6,84 и островного – 0,58 Гт  $C_{\text{орг}}$ . Работа восполняет критический пробел в региональных оценках запасов углерода в одном из самых холодных регионов мира, обеспечивая научную основу для анализа рисков, связанных с таянием многолетней мерзлоты.

**Ключевые слова:** запасы общего органического углерода, многолетнемерзлые породы, физико-географические провинции, Якутия

#### ORGANIC CARBON STORAGE IN ACTIVE LAYER AND PERMAFROST BY PHYSICAL-GEOGRAPHICAL PROVINCES OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

A.G. Shepelev

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Email: carbon-shag@yandex.ru

The present study assesses total organic carbon stocks in the active soil layer (excluding ground cover) and permafrost as they are distributed among the physiographic provinces (54 categories) defined based on the permafrost landscape map of the Sakha Republic (Yakutia). Yakutia accumulates 84.9 Gt of TOC in the soil and upper permafrost roof. Plain provinces (60% of area), store 66.3 Gt, of which the ice complex accounts for 41.5 Gt. Landscapes having an ice complex (16 provinces) are highly vulnerable containing the largest stock of organic carbon in host rocks, which may lead to the release of huge amounts of carbon during ground ice degradation and melting. Mountain provinces account for 40% of the total area and contain up to 18.6 Gt of the total sequestered carbon stock. Organic carbon stocks distribution among permafrost types reveals that continuous provinces contain 77.5 Gt, discontinuous provinces 6.84 Gt, and island provinces 0.58 Gt. These findings fill a critical gap in regional carbon stock estimates in one of the coldest regions of the world thereby providing a scientific basis for analyzing the risks associated with permafrost thawing.

**Keywords:** total organic carbon storage, permafrost, physical-geographical provinces, Yakutia

#### Введение

Почвы представляют значительный резервуар углерода на планете, вмещающий около 2500 млрд. т поглощенного углерода [87]. Площадь, занимаемая мерзлотными почвами, составляет 8,6 млн. км<sup>2</sup> или около 27% всей суши к северу от 50 с.ш. [95]. Климатические условия Якутии обуславливают сезонное протаивание почвы в теплый период и промерзание в зимний, что влияет на мощность деятельного слоя почвы. Биохимические и физико-химические процессы, происходящие в этом слое, вносят существенный вклад в генерацию экосистемного органического углерода. Почвы северных широт являются ключевым компонентом глобального углеродного цикла, а регион с многолетней мерзлотой покрывает 22% Северного полушария и содержит почти вдвое больше углерода, чем атмосфера. При этом запасы общего органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в разных климатических зонах России недооцениваются из-за сложной неоднородности [68] и ландшафтного разнообразия. Исследования, посвященные захоронению почвенного органического углерода в условиях многолетней мерзлоты [60] предполагают, что глобальные запасы углерода занижены в два раза и более для субарктических и арктических экосистем. Связано это с преуменьшением значимости законсервированного углерода в криотурбированных и органических почвах [28, 42, 44, 46, 61, 80]. Более того не учтенными остаются участки с прерывистыми зонами мерзлоты, где большая часть ландшафта фактически остается без мерзлого основания.

В глобальном масштабе запасы углерода почв составляют 1417 Гт, на долю Российской Федерации приходится 216 Гт или 15% мировых запасов [31]. В циркумполярной области содержится порядка 1300–1395 Гт наземного органического углерода [41, 91], а в тундровых ландшафтах около 30% мирового запаса

$S_{орг}$  [54]. Только в многолетнемерзлых породах (ММП) законсервировано порядка 850 Гт углерода [45]. Из-за таяния толщ ледового комплекса позднего плейстоцена они могут превратиться из поглотителя углерода в неизбежный его источник благодаря насыщенности органическим материалом и илистыми фракциями. В отложениях позднего плейстоцена находится 83 Гт углерода [77], а в голоценовых термокарстовых образованиях – 130 Гт [86]. Следовательно, отложения накапливались быстрыми темпами, что привело к захоронению исходного материала, а растительные и животные остатки не успели разложиться до конечных продуктов метаболизма. В современный период сохранность и стабильность углерода в многолетней мерзлоте во многом зависит от степени деградированности ММП и антропогенного влияния на экосистему. Наиболее опасными в высвобождении углерода из ландшафтов Якутии являются деградированные площади ледового комплекса с активным развитием термокарстовых процессов вследствие сокращения объема подземных льдов и их таяния, а также повышения температуры ММП, что является причинно-следственной связью утраты органического углерода из состава органического вещества почвы.

Изменения, происходящие в структуре климата планеты [27, 36] на обширных северных территориях, вызывают трансформацию мерзлотных ландшафтов, расширяясь в пространстве северной и восточной Сибири. Результаты проявляются в виде образования озер, заболачивания и термоцирков, доминирующих в ландшафте. Происходят активизация криогенных процессов (термокарст, пучение, термоабразия и др.) и повсеместная деградация мерзлоты. При этом повышаются риски потерь резервуаров органического вещества из почвенного покрова и ММП, что вызывает ускоренное анаэробное и аэробное микробное разложение [38], потенциально ведущее к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу, создающих положительную обратную связь с повышением температуры воздуха [79]. При этом происходит глубокое прогревание почвы, что способствует активному разложению и потерям ее органической части с изменением гидрологических условий [40], сопровождающимися высокой нагрузкой парниковых газов на атмосферу. Прогнозные оценки показывают, что к 2100 году деградация многолетней мерзлоты способна увеличить газообразные потери почвенного углерода на 5–15% за счет мобилизации его депонированной части [69].

Цель работы – количественная оценка запасов  $S_{орг}$  в почвах и ММП различных физико-географических провинций Республики Саха (Якутия) в толще 0–3 м. В исследовании решались задачи по анализу и обобщению полевых и литературных данных для составления карты распределения  $S_{орг}$  в пределах указанных провинций.

#### Материалы и методы исследований

Прямые измерения содержания  $S_{орг}$  в мерзлотных ландшафтах получены в результате отбора образцов почвы и многолетнемерзлых отложений в полевых условиях на обширной территории Якутии в течение 10 лет. Запасы  $S_{орг}$  оценены из собственного и обобщенного научного материала по мерзлотным почвам и ММП Якутии [2–4, 6–11, 18, 20, 22–26, 29, 30, 32, 33, 35, 37, 41, 43, 47, 50–52, 57, 59, 63–67, 69–76, 78, 82–84, 86, 88–90, 93, 94, 96] (табл. 1).

Содержание  $S_{орг}$  определяли на сертифицированном элементном анализаторе LECO RC-612 в твердых образцах по стандарту DIN19539 методом температурного программирования, что позволяет идентифицировать различные формы углерода. Анализ проведен в трех определениях. Запасы  $S_{орг}$  рассчитаны отдельно для каждого генетического горизонта почвы и ММП с интервалом отбора образцов 20–40 см в зависимости от чередования состава отложений, затем суммировались для получения общих запасов в почве и ММП. Расчет запасов  $S_{орг}$  выполнен с использованием формулы (1).

$$S = X \times \rho \times H \times f(1)$$

где:  $S$  – запасы углерода в почве и ММП, кг/м<sup>2</sup>;  $X$  – содержание  $S_{орг}$  в почве и ММП, %;  $\rho$  – плотность сложения почвы и ММП, г/см<sup>3</sup>;  $H$  – мощность генетического горизонта, см;  $f$  – доля фракции <2 мм в минеральном горизонте. Для определения в минеральных горизонтах доли мелкозема (<2 мм) образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Его доля во всех минеральных слоях равнинных территорий составляет 100%, поэтому в формуле расчета запасов  $S_{орг}$  этот показатель не учитывался. В почвах с преобладанием фракции <2 мм рассчитывали долю мелкозема и использовали ее в формуле (1). Для расчета плотности в почвенных образцах, отобранных из генетических горизонтов, использовали стальные цилиндры объемом 100 см<sup>3</sup>. Для определения плотности мерзлых пород учитывали содержание льда и минеральной части с пересчетом на сухую навеску, что обеспечивает корректное сопоставление с почвенными значениями.

В настоящем исследовании анализ напочвенного покрова не проведен и из расчета запасов  $S_{орг}$  почв и ММП исключен. Данный подход соответствует методологии, применяемой в базе данных The Northern Circumpolar Soil Carbon Database (NCSCD) [41].

Торфяные, грубогумусовые и гумусовые горизонты отбирали как часть почвенного разреза и учитывали в расчетах запасов с указанием их мощности. Растительные остатки (корни, тонкие корневые волоски, животные остатки, фрагменты стеблей и угля) из минеральных горизонтов удаляли вручную перед анализом, чтобы избежать завышения содержания  $S_{орг}$ .

При анализе литературных данных по содержанию  $C_{орг}$  в почве и отложениях основное внимание уделено методу сухого сжигания. В случае отсутствия данных по содержанию углерода для определенной уникальной провинции Якутии использованы результаты измерений гумуса, полученные методом Тюрина в различных модификациях. Эти данные пересчитаны на углерод с использованием коэффициента 1,724. Следует отметить, что результаты, полученные таким способом, варьируют в зависимости от типа почвы. В настоящей работе доля таких публикаций составила 9%.

Недостающие данные по органическому углероду для физико-географических зон Якутии восполнены из международной базы данных по углероду циркумполярных почв NCSCD и литературных источников, в том числе из базы публикаций Pangaea [35], относящихся непосредственно к изучаемой территории. NCSCD создана для решения проблемы роли многолетней мерзлоты в глобальном цикле углерода. В ней связаны 1778 почвенных педонов – от северных районов многолетней мерзлоты до нескольких оцифрованных региональных и национальных почвенных карт – с целью комплексного циркумполярного покрытия. В совокупности эти наборы данных используют для количественной оценки законсервированного  $C_{орг}$  в верхнем слое почвы на глубине 0–30 см и ниже 1 м для ММП. В нашем исследовании взята толща 0–3 м (сумма 0–1, 1–2 и 2–3 м), что позволяет включить не только собственно генетические горизонты почвы, но и верхнюю часть мерзлоты, где находятся значительные запасы углерода. Если ограничиться только 0–30 см, общая региональная оценка запасов  $C_{орг}$  окажется существенно ниже, особенно для отложений ледового комплекса, в которых высокое содержание  $C_{орг}$  зафиксировано на глубинах до 3–5 м. Например, в слое 0–30 см заключено около 30% от общего запаса в 0–3 м толще, а присоединение глубоких горизонтов увеличивает региональную оценку примерно в 3 раза [41, 70, 78], что критически важно для экологического и геокриологического мониторинга при деградации многолетней мерзлоты.

Информационная основа NCSCD – это набор координатных точек, полученных из различных региональных почвенных карт, литературы, прогнозного анализа и типов распространения ММП. База данных позволяет использовать периодически обновляющийся набор сведений с координатной привязкой на основе полигонов, доступных в виде Tiff-файлов и двоичного формата файлов Network Common Data Form. Собранный материал в статье показывает число определений для конкретных почвенных групп, являющихся достаточными, тогда как в других случаях их не хватает для статистической достоверности [1, 12]. Поэтому важно, чтобы каждый класс выборки являлся статистически достоверным для использования в региональных базах данных. Однако общее число точек отбора в базе данных не определяет точность, ключевым фактором является репрезентативность каждого отдельного класса в полигоне [19, 53].

Для создания карты запасов  $C_{орг}$  применена методика и принципы составления мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [16, 17]. На ее основе и границах ландшафтных комплексов проведено картографирование углерода в масштабе 1:11 350 000. В результате построены полигоны на всю территорию республики, каждому полигону присвоены данные о запасах углерода по физико-географическим провинциям. Картографические работы выполнены в геоинформационной среде с открытым исходным кодом QGIS ver. 3.40.10-Bratislava. Первичная статистическая обработка данных осуществлена в программе Statistica ver. 10 для Windows 10 для расчета стандартного отклонения из собранного массива данных и отдельно для каждой физико-географической области Якутии.

### Результаты исследования и обсуждение

Республика Саха (Якутия) самый крупный субъект Российской Федерации с площадью 3,1 млн. км<sup>2</sup>, расположена в трех физико-географических странах: Средней, Северо-Восточной и горах Южной Сибири, включающие 54 региональные провинции от равнинных территорий до горных систем и вмещающие колоссальные запасы  $C_{орг}$  (табл. 1).

В таблице представлены средние запасы  $C_{орг}$  в кг/м<sup>2</sup>, на основе которых проведены расчеты для каждой провинции. Большую часть территории Якутии занимают мерзлотные ландшафты, литогенную основу которых составляют ММП [34] с характерными криогенными процессами и различной мощностью мерзлой толщи. Выделяются три типа развития и распространения многолетней мерзлоты: островная, прерывистая и сплошная, причем последний тип преобладает в иерархии мерзлотных ландшафтов республики. Арктические и бореальные области концентрируют в ландшафтах до 50% мирового пула органического углерода [39, 69]. Необходимо помнить, что арктические водно-болотные угодья сохраняют тенденцию к поглощению углерода из атмосферы. Данное утверждение подтверждается новыми исследованиями [49]: увеличение секвестрации углерода происходит, вопреки деградации ММП, на 12–18% или 0,8–1,2 Гт С в год за счет роста первичной продуктивности растительности и потепления климата. И наоборот, бореальные экосистемы являются источниками углерода, особенно болота Западной Сибири и торфяные земли Юго-Восточной Азии вследствие пожаров, засух и снижения уровня воды. Поэтому положительный эффект аккумуляции углерода в Арктике компенсируется негативными последствиями в перечисленных регионах мира.

Табл. 1.

**Сводная характеристика запасов общего органического углерода, приуроченных к провинциям Республики Саха (Якутия)**

| Мерзлотно-ландшафтное районирование*                                                                                                            | Провинция                                  | Площадь (км <sup>2</sup> ) | % от общей площади | Средние запасы в десятильном слое и МПП 0–3 м (кг/м <sup>2</sup> )**<br>[источник данных] | Запасы на площадь (Гг) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>А. Страна Средняя Сибирь</b>                                                                                                                 |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| <i>I. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП</i>                                                                              |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| A.I.1                                                                                                                                           | Анабаро-Оленекская озерно-термокарстовая   | 55504                      | 1,8                | 30,00±4,50 [42, 44, 61, 80]                                                               | 1,67±0,25              |
| <i>II. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП</i>                                                                         |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| A.П.1                                                                                                                                           | Анабаро-Оленекская задровая                | 44711                      | 1,5                | 15,00±1,80 [42, 80]                                                                       | 0,67±0,08              |
| A.П.2                                                                                                                                           | Аргасалинская задровая                     | 26210                      | 0,9                | 10,00±1,20 [12, 46, 80]                                                                   | 0,26±0,03              |
| A.П.3                                                                                                                                           | Оленекская увалистая                       | 176686                     | 5,7                | 37,50±4,50 [42, 80]                                                                       | 6,63±0,80              |
| A.П.4                                                                                                                                           | Эйикская водораздельно-маревая             | 104747                     | 3,4                | 74,13±11,12 [12, 46, 80]                                                                  | 7,76±1,67              |
| A.П.5                                                                                                                                           | Нижнеленская северно-термокарстовая        | 29294                      | 1,0                | 46,00±6,90 [42, 80]                                                                       | 1,35±0,20              |
| A.П.6                                                                                                                                           | Приленская моренная                        | 48103                      | 1,6                | 35,19±4,22 [42, 80]                                                                       | 1,69±0,20              |
| A.П.7                                                                                                                                           | Приалданская морено-задровая               | 31452                      | 1,0                | 16,92±2,03 [31, 80]                                                                       | 0,53±0,06              |
| <i>III. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП</i>                       |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| A.Ш.1                                                                                                                                           | Анабарская плоскогорная                    | 24052                      | 0,8                | 29,00±5,80 [42, 80, 88]                                                                   | 0,70±0,14              |
| A.Ш.2                                                                                                                                           | Хара-Тасская плоскогорная                  | 8634                       | 0,3                | 24,25±4,85 [61, 80, 88]                                                                   | 0,21±0,04              |
| A.Ш.3                                                                                                                                           | Кыстыкская грядово-ступенчатая             | 14801                      | 0,5                | 24,67±4,93 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,37±0,07              |
| A.Ш.4                                                                                                                                           | Верхневиллоиская столово-останцовая        | 63521                      | 2,1                | 27,40±5,48 [12, 46, 80, 88]                                                               | 1,74±0,35              |
| <i>IV. Группа среднетаежных провинций сплошного распространения ММП</i>                                                                         |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| A.IV.1                                                                                                                                          | Тунгусско-Ботуобинская ступенчато-грядовая | 136600                     | 4,4                | 20,00±2,10 [12, 46, 80]                                                                   | 2,73±0,27              |
| A.IV.2                                                                                                                                          | Средневиллоиская пологоувалистая           | 96514                      | 3,1                | 25,00±2,50 [12, 46, 80]                                                                   | 2,41±0,24              |
| A.IV.3                                                                                                                                          | Виллоиская аласная                         | 141534                     | 4,6                | 28,00±3,36 [31, 80]                                                                       | 3,96±0,48              |
| A.IV.4                                                                                                                                          | Лено-Виллоиская пологоводнистая            | 88497                      | 2,9                | 27,30±2,13 [41, 80]                                                                       | 2,42±0,24              |
| A.IV.5                                                                                                                                          | Лено-Амгинская аласная                     | 58895                      | 1,9                | 30,32±3,64 [27, 31, 36, 38, 42, 45, 54, 77, 80, 86, 91]                                   | 1,79±0,21              |
| A.IV.6                                                                                                                                          | Лено-Алданская карстовая                   | 82872                      | 2,7                | 25,67±3,85 [12, 46, 80]                                                                   | 2,13±0,32              |
| A.IV.7                                                                                                                                          | Амгино-Алданская пологоувалистая           | 107923                     | 3,5                | 34,98±3,50 [42, 79, 80]                                                                   | 3,78±0,39              |
| A.V.1                                                                                                                                           | Нюя-Олекминская увалистая                  | 55504                      | 1,8                | 28,13±4,22 [12, 46, 80]                                                                   | 1,56±0,23              |
| A.V.2                                                                                                                                           | Олекмо-Алданская увалистая                 | 100831                     | 3,3                | 31,75±4,76 [12, 46, 80]                                                                   | 3,20±0,48              |
| <i>VI. Группа среднетаежных провинций островного распространения ММП</i>                                                                        |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| A.VI.1                                                                                                                                          | Приленская увалистая                       | 23743                      | 0,8                | 24,42±4,40 [12, 46, 80]                                                                   | 0,58±0,10              |
| <b>Б. Страна гор Южной Сибири</b>                                                                                                               |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| <i>I. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов прерывистого распространения ММП</i>                              |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| Б.И.1                                                                                                                                           | Олекмо-Чарская низкогорная                 | 15726                      | 0,5                | 19,42±4,27 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,31±0,07              |
| <i>II. Группа провинций с горно-таежными и горно-редколесными природными комплексами прерывистого распространения ММП</i>                       |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| Б.П.1                                                                                                                                           | Олекмо-Тимптонская плоскогорная            | 48720                      | 1,6                | 16,54±3,31 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,81±0,16              |
| Б.П.2                                                                                                                                           | Чульманская плоскогорная                   | 14184                      | 0,5                | 19,33±3,87 [40, 80, 88]                                                                   | 0,27±0,06              |
| <i>III. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и подгольцовых природных комплексов сплошного и прерывистого распространения ММП</i> |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| Б.Ш.1                                                                                                                                           | Становая среднегорная                      | 22202                      | 0,7                | 11,00±2,42 [69, 80, 88]                                                                   | 0,24±0,05              |
| Б.Ш.2                                                                                                                                           | Тимптоно-Учурская среднегорная             | 96823                      | 3,1                | 11,73±2,58 [35, 80, 88]                                                                   | 1,14±0,25              |
| <b>В. Страна Северо-Восточная Сибирь</b>                                                                                                        |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| <i>I. Группа провинций арктическо-тундровых островов сплошного распространения ММП</i>                                                          |                                            |                            |                    |                                                                                           |                        |
| В.И.1                                                                                                                                           | Провинция Новосибирских островов           | 37619                      | 1,2                | 66,00±18,48 [42, 43, 48, 53, 73, 80, 83, 84, 90, 93]                                      | 2,48±0,70              |

| Мерзлотно-ландшафтное районирование*                                                                                              | Провинция                              | Площадь (км <sup>2</sup> ) | % от общей площади | Средние запасы в деятельном слое и МПП 0-3 м (кг/м <sup>2</sup> )**<br>[источник данных] | Запасы на площадь (Гт) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <i>II. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП</i>                                                               |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.II.1                                                                                                                            | Дельта р. Лены                         | 26210                      | 0,9                | 114,19±34,26 [2, 12, 29, 30, 42, 48, 50, 52, 70, 72, 80, 83, 84, 93]                     | 2,99±0,90              |
| В.II.2                                                                                                                            | Нижнеянская северо-термокарстовая      | 41936                      | 1,4                | 36,48±5,47 [42, 48, 80]                                                                  | 1,53±0,23              |
| В.II.3                                                                                                                            | Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая | 99906                      | 3,3                | 2,50±6,38 [30, 38, 42, 43, 76, 80, 83, 84, 93]                                           | 4,25±0,64              |
| В.II.4                                                                                                                            | Алазее-Колымская озерно-термокарстовая | 65988                      | 2,1                | 0,92±4,64 [42, 66, 80, 83, 86, 89, 96]                                                   | 2,04±0,31              |
| <i>III. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП</i>                                                          |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.III.1                                                                                                                           | Абыйская озерно-термокарстовая         | 50262                      | 1,6                | 38,64±5,80 [42, 80]                                                                      | 1,94±0,29              |
| В.III.2                                                                                                                           | Колымская озерно-термокарстовая        | 124574                     | 4,0                | 7,71±7,16 [30, 42, 43, 48, 57, 64, 67, 74, 80, 86]                                       | 5,94±0,89              |
| <i>IV. Группа провинций с преобладанием горно-тундровых природных комплексов сплошного распространения ММП</i>                    |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.IV.1                                                                                                                            | Кряжи Прончищева и Чекановского        | 42861                      | 1,4                | 3,00±0,66 [26, 33, 48, 80, 83, 84, 88, 93]                                               | 0,13±0,03              |
| В.IV.2                                                                                                                            | Хараулахская низкогорная               | 33919                      | 1,1                | 7,50±1,65 [32, 72, 80, 88]                                                               | 0,25±0,06              |
| В.IV.3                                                                                                                            | Куларская низкогорная                  | 20351                      | 0,1                | 7,00±1,54 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,14±0,03              |
| В.IV.4                                                                                                                            | Полоусненская низкогорная              | 69688                      | 2,3                | 5,60±1,23 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,39±0,09              |
| В.IV.5                                                                                                                            | Кондаковско-Улахансисская низкогорная  | 24360                      | 0,8                | 6,90±1,52 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,17±0,04              |
| В.IV.6                                                                                                                            | Северо-Анхойская низкогорная           | 5039                       | 0,2                | 8,00±1,76 [43, 80, 88]                                                                   | 0,04±0,01              |
| <i>V. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов сплошного распространения ММП</i>                   |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.V.1                                                                                                                             | Приверхоянская моренная                | 30219                      | 1,0                | 29,33±5,87 [12, 46, 80]                                                                  | 0,89±0,18              |
| В.V.2                                                                                                                             | Янская плоскогорная                    | 64754                      | 2,1                | 36,08±7,22 [42, 78, 80, 82, 88]                                                          | 2,34±0,47              |
| В.V.3                                                                                                                             | Адыче-Эльгинская плоскогорная          | 83564                      | 2,7                | 20,17±4,03 [12, 46, 80, 88]                                                              | 1,69±0,34              |
| В.V.4                                                                                                                             | Оймяконская плоскогорная               | 33611                      | 1,1                | 16,45±3,29 [80, 88, 94]                                                                  | 0,55±0,11              |
| В.V.5                                                                                                                             | Алазейская плоскогорная                | 21021                      | 0,7                | 30,42±6,08 [12, 46, 80, 88]                                                              | 0,64±0,13              |
| В.V.6                                                                                                                             | Нерская плоскогорная                   | 13568                      | 0,5                | 19,67±3,93 [12, 46, 80, 88]                                                              | 0,27±0,05              |
| В.V.7                                                                                                                             | Юкагирская низкогорная                 | 53345                      | 1,7                | 23,20±4,64 [12, 46, 80, 88]                                                              | 1,24±0,25              |
| <i>VI. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП</i>          |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.VI.1                                                                                                                            | Орулганская среднегорная               | 81714                      | 2,7                | 5,83±1,46 [12, 46, 80, 88]                                                               | 0,48±0,12              |
| В.VI.2                                                                                                                            | Верхоянская среднегорная               | 69380                      | 2,3                | 7,25±1,81 [75, 80, 88]                                                                   | 0,50±0,13              |
| В.VI.3                                                                                                                            | Сетте-Дабанская среднегорная           | 50262                      | 1,6                | 10,25±2,56 [65, 80, 88]                                                                  | 0,52±0,13              |
| В.VI.4                                                                                                                            | Сунтар-Хаятинская среднегорная         | 30527                      | 1,0                | 10,38±2,59 [12, 46, 80, 88]                                                              | 0,32±0,08              |
| В.VI.5                                                                                                                            | Черская среднегорная                   | 108232                     | 3,5                | 10,00±2,50 [43, 59, 63, 80, 88]                                                          | 1,08±0,27              |
| В.VI.6                                                                                                                            | Момская среднегорная                   | 55195                      | 1,8                | 14,27±3,57 [80, 88]                                                                      | 0,79±0,20              |
| <i>VII. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и северотаежных природных комплексов сплошного распространения ММП</i> |                                        |                            |                    |                                                                                          |                        |
| В.VII.1                                                                                                                           | Момо-Селенняхская межгорно-котловинная | 27135                      | 0,9                | 16,79±3,02 [12, 46, 80, 88]                                                              | 0,46±0,08              |
| <b>Итого:</b>                                                                                                                     |                                        | <b>3083523</b>             | <b>100</b>         | <b>25,71±4,66</b>                                                                        | <b>84,94±12,10</b>     |

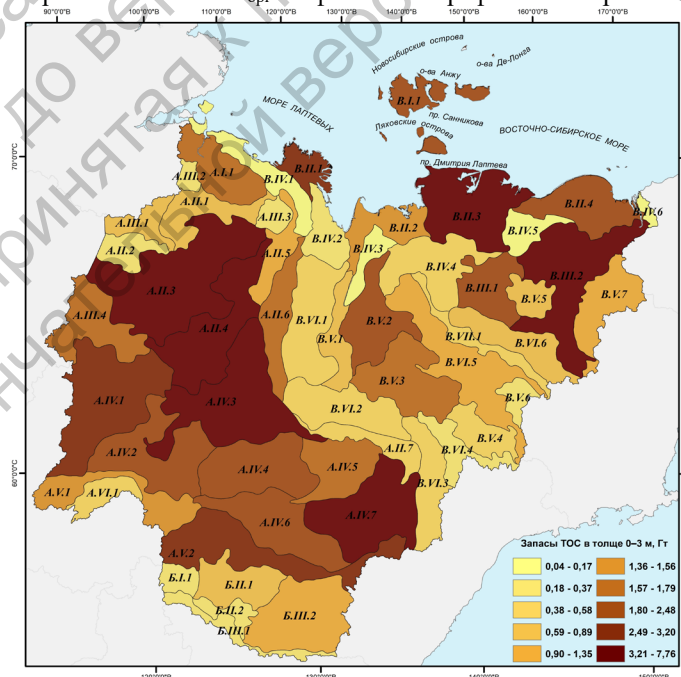
\*Примечание. А.I.1 - Анабаро-Оленекская озерно-термокарстовая. А.II.1 - Анабаро-Оленекская зандровая, А.II.2 - Аргасалинская зандровая, А.II.3 - Оленекская увалистая, А.II.4 - Эйикская водораздельно-маревая, А.II.5 - Нижнеленская северно-термокарстовая, А.II.6 - Приленская моренная, А.II.7 - Приалданская морено-зандровая. ММП А.III.1 - Анабарская плоскогорная, А.III.2 - Хара-Тасская плоскогорная, А.III.3 - Кыстыкская грядово-ступенчатая, А.III.4 - Верхневиллойская столово-останцовая. А.IV.1 - Тунгусско-Ботубобинская ступенчато-грядовая, А.IV.2 - Средневиллойская пологоувалистая, А.IV.3 - Виллойская аласная, А.IV.4 - Лено-Виллойская пологоволнистая, А.IV.5 - Лено-Амгинская аласная, А.IV.6 - Лено-Алданская карстовая, А.IV.7 - Амгино-Алданская пологоувалистая. А.V.2 - Олекмо-Алданская увалистая. А.VI.1 - Приленская увалистая. Б.I.1 - Олекмо-Чарская низкогорная. Б.II.1 - Олекмо-Тимптонская плоскогорная, Б.II.2 - Чульманская плоскогорная. Б.III.1 - Становая среднегорная, Б.III.2 - Тимптоно-Учурская среднегорная. В.I.1 - Провинция Новосибирских островов.

В.П.1 - Дельта р. Лены, В.П.2 - Нижнеянская северо-термокарстовая, В.П.3 - Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая, В.П.4 - Алазее-Колымская озерно-термокарстовая. В.П.1 - Абыйская озерно-термокарстовая, В.П.2 - Колымская озерно-термокарстовая. В.И.1 - Кряжи Прончищева и Чекановского, В.И.2 - Хараулахская низкогорная, В.И.3 - Куларская низкогорная, В.И.4 - Полоусненская низкогорная, В.И.5 - Кондаковско-Улахансисская низкогорная, В.И.6 - Северо-Ануйская низкогорная. В.В.1 - Приверхоянская моренная, В.В.2 - Янская плоскогорная, В.В.3 - Адыче-Эльгинская плоскогорная, В.В.4 - Оймяконская плоскогорная, В.В.5 - Алазейская плоскогорная, В.В.6 - Нерская плоскогорная, В.В.7 - Юкагирская низкогорная. В.В.1 - Орулганская среднегорная, В.В.2 - Верхоянская среднегорная, В.В.3 - Сетте-Дабанская среднегорная, В.В.4 - Сунтар-Хаятинская среднегорная, В.В.5 - Черская среднегорная, В.В.6 - Момская среднегорная. VII.1 - Момо-Селенняхская межгорно-котловинная.  $M \pm SD$  - стандартное отклонение.

В сложных мерзлотных условиях Якутии процессы формирования и аккумуляции углерода происходили в два этапа, различающихся по механизмам сохранения и вовлечения органического вещества в биогеохимические циклы. На первом этапе, охватывающем плейстоцен (2,59 млн – 11,7 тыс. лет назад), углерод накапливался в законсервированной форме во вмещающих отложениях ММП. Этот процесс обусловлен действием криогенных процессов – промерзания, морозобойного растрескивания и термокарста, которые обеспечивали физическую консервацию органического вещества и предотвращали его минерализацию. Сохранность углерода на этом этапе напрямую зависела от состояния ММП, выступавших в роли криогенного консерванта. На втором этапе, голоцене (11,7 тыс. лет назад – настоящее время), углерод активно вовлечен в экосистемный круговорот веществ. Его ежегодное обновление тесно связано с продуктивностью биогеоценозов, интенсивностью обменных процессов между почвой, растительностью и атмосферой. В этих условиях углерод накапливается в напочвенном покрове, гумусовом и торфяном горизонтах, формируя современный деятельный слой. Как итог, аккумуляция углерода в регионе происходила на протяжении двух геологических эпох: более древний углерод плейстоценового возраста постепенно дополняется вновь образованным  $S_{орг}$  из современного ландшафта, что создает сложную стратиграфию запасов углерода. Закономерности данного процесса фиксируются в двух пространственных масштабах. На региональном уровне они проявляются в виде значительных вариаций содержания  $S_{орг}$  между физико-географическими провинциями – от равнин Центральной Якутии до примитивных почв горных систем. На локальном уровне они выражаются в распределении  $S_{орг}$  по профилю генетических горизонтов почвы и мерзлых отложений, где последовательно сменяют друг друга.

В настоящее время цикл углерода протекает в деятельном слое почвы, включая почвообразующую породу, а иногда в защитном слое ММП, когда он при благоприятных климатических условиях сливается с деятельным слоем. Этот цикл включает происходящие в почве микробиологические и физико-химические процессы, которые отвечают за переработку и минерализацию органического вещества, а также за генерацию углерода в экосистеме. При изменении климатических условий и сдвиге температурного режима в криолитозоне активизируются термокарстовые процессы, приводящие к таянию ММП и утрате ранее законсервированного углерода, что сопровождается усилением эмиссии активных атмосферных газов.

На рис. 1 показаны расчеты запасов  $S_{орг}$  по физико-географическим провинциям Якутии.



**Рис. 1.** Запасы  $S_{орг}$  в толще 0–3 м почвенного покрова (без напочвенного покрова) и ММП в физико-географических провинциях Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:11 350 000

Развитие верхней кровли многолетней мерзлоты в определенных орографических условиях предопределяет консервацию углеродсодержащих веществ. Для понимания функционирования биологических систем в геологических формациях криолитозоны необходима оценка их связи с потенциальной дестабилизацией природной среды в экстремальных условиях Арктики и бореальных экосистем. По результатам анализа полевых исследований и литературных данных, запасы  $C_{орг}$  в пределах Якутии характеризуются значительной пространственной неоднородностью (см. табл. 1). Максимальная аккумуляция углерода приурочена к равнинным мерзлотным ландшафтам – тундровым, северо- и среднетаежным провинциям, которые занимают 42% территории, но обеспечивают основную долю секвестрации  $C_{орг}$  в почвах и ММП. Наименьшие запасы, напротив, свойственны горным территориям Южной Сибири и провинциям с преобладанием горных природных комплексов. Суммарные запасы  $C_{орг}$  в почве и ММП оценены в 85 Гт, что подчеркивает значительный вклад региона в глобальный пул углерода криолитозоны.

Основные запасы  $C_{орг}$  сосредоточены в районах распространения ММП сплошного типа, занимающие 89,6% территории Якутии. В количественном выражении эти запасы составляют 77,5 Гт. Прерывистый тип ММП охватывает 9,6% площади и характеризуется запасами в размере 6,84 Гт. Островной тип ММП является наименее распространенным, охватывая лишь 0,8% площади, в нем аккумулировано 0,58 Гт. Определенную уязвимость представляют мерзлотные ландшафты Якутии, развитые на ледовом комплексе (ЛК). Их занимаемая площадь составляет 1 043 990 км<sup>2</sup> или 34% территории республики. К мерзлым толщам ЛК относятся физико-географические провинции (всего 16): А.І.1, А.ІІ.1, А.ІІ.4, А.ІІ.5, А.ІІ.7, А.ІV.3, А.ІV.4, А.ІV.5, В.І.1, В.ІІ.1, В.ІІ.2, В.ІІ.3, В.ІІ.4, В.ІІІ.1, В.ІІІ.2 и В.ІV.1. Породы ЛК неустойчивы к изменению теплового режима грунтов, что обусловлено их повышенной льдистостью, достигающей до 90% занимаемого объема мерзлых отложений [5]. При их деградации и потере части подземного льда высвободится неопределенное количество углерода в разных формах: от газообразных до водорастворимых. На основании имеющихся данных о содержании органического углерода в почвах и ММП провинций ледового комплекса установлено, что общий запас  $C_{орг}$  составляет 41,5 Гт.

Неопределенность оценок углерода связана со степенью активизации экзогенных процессов, происходящих в криосфере. Какое продолжительное время термокараст будет воздействовать на ЛК и получит ли дальнейшее развитие при повышении температуры воздуха? Изменятся ли растительные сообщества и растительный покров, выполняющие функцию защитного барьера для многолетней мерзлоты [14, 15]? Учтено ли достоверно и полностью количество запасенного углерода в почве и ММП? Ответить на эти вопросы можно будет спустя время, наблюдая за динамикой температуры воздуха и грунтов, а также анализируя космические снимки для выявления термокарстовых процессов и их развития. Однако сейчас известно, что выбросы углерода могут снижаться на завершающейся стадии деградации ММП, то есть при сокращении (вытаивании) объема подземных льдов [56, 81, 85].

Полученные данные позволяют дифференцировать не только запасы, но и потенциальные риски их высвобождения. Несмотря на то, что горные провинции занимают 40% территории и содержат 18,6 Гт  $C_{орг}$  (22% от общих запасов), их уязвимость к термокарасту и деградации ММП существенно ниже, чем у равнинных территорий. Это связано с литогенной основой и меньшим наличием подземного льда в отложениях и естественным дренажем территории. Напротив, равнинные провинции, особенно зоны сплошного распространения ММП, являются критическими областями с точки зрения обратной связи с климатом. Повторим, здесь сосредоточено 77,5 Гт  $C_{орг}$ , причем ключевая роль принадлежит экосистемам, развитым на средне- и высокольдистых отложениях ЛК. Сокращение площади ЛК вследствие убыли повторно-жильных льдов может привести к необратимой трансформации рельефа, изменению гидрологического режима и, как следствие, смене типа растительности, что в начальной стадии резко усилит выделение парниковых газов и потери большей части законсервированного органического вещества почвы.

Ключевыми взаимосвязями для минерализации почвенного органического вещества при деградации ММП служат почвенный азот и углерод, то есть отношение C/N и микробиологическая активность, но поскольку содержание азота в почвах и отложениях Якутии низкое, не следует ожидать полной утраты углерода из экосистемы. Отношение C/N играет важную роль в интенсивности и скорости разложения растительных остатков, а также на активность гетеротрофных микроорганизмов в естественных условиях окружающей среды. Высокое содержание  $C_{орг}$  в сочетании с низким содержанием общего азота способствует слабому разложению поступающего, а также законсервированного органического материала, что обусловлено замедлением процесса аммонификации (разложение азотсодержащих органических веществ) на бедных азотом средах и в холодных условиях. Поэтому следует полагать, что органическое вещество с высоким содержанием  $C_{орг}$  нарушает соотношение между C/N и приводит к иммобилизации азота микроорганизмами. В таком случае азот не аккумулируется в почве, а расходуется микроорганизмами, переводится в микробную биомассу и выделяется в атмосферу в виде N<sub>2</sub>O (закиси азота). При активизации криогенных процессов. Например, средняя и высокая льдистость многолетнемерзлых толщ ЛК и едомных возвышенностей проявляется в виде полигонального морозобойного растрескивания грунтов и сопровождается ростом повторно-жильных льдов. В результате происходит механическое перемещение органического материала, что способствует его перераспределению в верхних слоях почвы и в более глубокие вмещающие породы, где он становится менее доступным для микробного разложения. Это

способствует консервации углерода в ММП, что особенно важно в условиях потепления климата, когда деградация мерзлоты приводит к высвобождению значительного объема углерода в атмосферу.

С одной стороны, термокарст способствует консервации углерода под слоем воды или минеральных отложений, что замедляет его разложение. С другой, происходит активная эмиссия углерода. Многое зависит от конкретных условий мерзлотного ландшафта и степени деградированности ЛК.

Таким образом, комплекс биолого-геологических условий оказывают значительное влияние на потери, распределение и динамику  $C_{орг}$  в ландшафте. Но не следует говорить о едином пагубном влиянии циклического изменения климата на функционирование мерзлотных ландшафтов. Новые исследования по потеплению климата свидетельствуют о позеленении Арктики и смещении границы леса ближе к северному пределу [51, 55, 58, 62, 92]. Безусловно, проверка этих заключений требует наблюдений за большим рядом данных и мониторинга растительного покрова с помощью дистанционного зондирования земли.

### Заключение

Проведенное исследование представляет собой первую полноценную для Республики Саха (Якутия) оценку запасов  $C_{орг}$  в деятельном слое почвы и верхней кровле многолетнемерзлых пород с детализацией до уровня физико-географических провинций.

Территория Якутии аккумулирует в почве и многолетней мерзлоте около 84,9 Гт общего органического углерода. Равнинные провинции, занимающие около 60% площади республики, хранят 66,3 Гт, причем 48,8% от общих запасов (или 41,5 Гт  $C_{орг}$ ) приходится на почвы и отложения ледового комплекса. Горные территории, охватывающие порядка 40% площади, содержат 18,6 Гт  $C_{орг}$ , что составляет 22% от суммарных запасов углерода в регионе.

Дифференциация запасов общего органического углерода по типу распространения ММП показывает подавляющее доминирование зоны сплошной мерзлоты (77,5 Гт) над прерывистой (6,84 Гт) и островной (0,58 Гт).

Высокая степень уязвимости ландшафтов ледового комплекса, которые, занимая лишь треть территории, концентрируют почти половину всего депонированного углерода Якутии, позволяет рассматривать их в качестве наиболее критического геологического образования при прогнозировании эмиссии парниковых газов в условиях деградации многолетней мерзлоты.

*Исследования выполнены в рамках базового проекта «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 126020516688-9).*

### Литература

1. Гаврилюк ЕА, Кузнецова АИ, Горнов АВ. Геопространственное моделирование содержания и запасов азота и углерода в лесной подстилке на основе разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2. Почвоведение. 2021;2:168-82. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020040>
2. Данилова АА, Данилов ПП, Макаров ВС, Винокуров АА. Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья. Почвы и окружающая среда. 2024;7(1):e245. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245>
3. Золотарева БН, Фоминых ЛА, Холодов АЛ, Ширшова ЛТ. Состав гумуса разновозрастных погребенных почв тундровой зоны. Почвоведение. 2009;5:540-50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11919137&ysclid=msn8jggps3910756928>
4. Иванова ТИ, Кузьмина НП, Чербунина МЮ. Микробное сообщество активного слоя почвы из обнажения Мамонтовой горы. Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2017;4:95-102. URL: <https://elibrary.ru/ytbvd?ysclid=msn8kpti2t535391401>
5. Конищев ВН. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата. Криосфера Земли. 2011;4:15-8. URL: [https://earthcryosphere.ru/archive/2011\\_4/03.Konishev\\_4\\_2011.pdf?ysclid=msn8mcta2m885536450](https://earthcryosphere.ru/archive/2011_4/03.Konishev_4_2011.pdf?ysclid=msn8mcta2m885536450)
6. Оконешникова МВ. Почвы Хараулахского хребта на самой северной границе леса. Современные проблемы науки и образования. 2016;5:306. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=25203&ysclid=msn8n8ms4e26062593>
7. Оконешникова МВ. Фракционно-групповой состав гумуса подбуров Южной Якутии. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018;6:239-43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36634865&ysclid=msn8o0ol82721421385>
8. Оконешникова МВ, Десяткин РВ. Почвы бассейна реки Тимптон (Южная Якутия). География и природные ресурсы. 2011;3:83-91. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16755404&ysclid=msn8or92ds624034563>
9. Оконешникова МВ, Десяткин РВ. Почвы северных отрогов хребта Черского в районе полюса холода: морфология, свойства, классификация. Почвоведение. 2017;8:926-35. DOI: 10.7868/S0032180X17080093
10. Оконешникова МВ, Иванова АЗ, Десяткин РВ. Почвы Верхоянского хребта в пределах Аркачанского плато. Почвоведение. 2020;5:509-18. DOI: 10.31857/S0032180X2005010X

11. Оконешникова МВ, Софронов РР. Почвы предгорий хребта Сетте-Дабан (северо-восточная Якутия). Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018;2:42-7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32508990&ysclid=msn8pk5r8v131130233>
12. Пастухов АВ, Каверин ДА, Щанов ВМ. Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Уса). Почвоведение. 2016;9:1042-51. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090100>
13. Тишков АА, Белоновская ЕА, Вайсфельд МА, Глазов ПМ, Кренке АН, Тertiцкий ГМ. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты. Арктика: экология и экономика. 2018;2:31-44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-31-44>
14. Тыртиков АП. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: Изд-во МГУ; 1968.
15. Тыртиков АП. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука; 1979.
16. Федоров АН. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1991.
17. Федоров АН, Ботулу ТА, Варламов СП, Васильев ИС, Грибанова СП, Дорофеев ИВ, Климовский ИВ, Самсонова ВВ, Соловьев ПА. Мерзлотные ландшафты Якутии: пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР». Новосибирск: ГУГК; 1989.
18. Черепанова АМ, Шепелев АГ. Содержание различных форм углерода в покровных отложениях ледового комплекса Центральной Якутии. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;1:68-77. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-68-77>
19. Чернова ОВ, Голозубов ОМ, Алябина ИО, Щепашенко ДГ. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России. Почвоведение. 2021;3:273-86. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>
20. Честных ОВ, Замолдчиков ДГ, Карелин ДВ. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем. Экология. 1999;6:426-32. URL: [http://ecology.genebee.msu.ru/3\\_SOTR/ChestnichOV/uglerod%20v%20pochvah%20tundr.pdf](http://ecology.genebee.msu.ru/3_SOTR/ChestnichOV/uglerod%20v%20pochvah%20tundr.pdf)
21. Чинилин АВ, Савин ИЮ. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018;91:46-62. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-91-46-62>
22. Шепелев АГ. Запасы углерода верхних отложений почв островов Самойловский, Большой Ляховский и Котельный. Арктика: экология и экономика. 2023;4:536-47. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-536-547>
23. Шепелев АГ, Григорьев МР, Черепанова АМ, Максимов ТХ, Федоров АН. Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024;3:397-407. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>
24. Шепелев АГ, Старостин ЕВ, Федоров АН, Максимов ТХ. Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии. Наука и образование. 2016;2:35-42. URL: <https://resar.elpub.ru/jour/article/view/743?ysclid=msn8y408t1731095097>
25. Шмелев ДГ, Краев ГН, Веремеева АА, Ривкина ЕМ. Содержание углерода в мерзлых отложениях Северо-Востока Якутии. Криосфера Земли. 2013;3:50-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20154219&ysclid=msn8z03emq966619600>
26. Beer C, Knoblauch C, Hoyt AM, Hugelius G, Palmtag J, Mueller CW, Trumbore S. Vertical pattern of organic matter decomposability in cryoturbated permafrost-affected soils. Environ Res Lett. 2022;17:104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9198>
27. Bjorkman AD, Myers-Smith IH, Elmendorf SC. Plant functional trait change across a warming tundra biome. Nature. 2018;562:57-62. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7>
28. Bockheim JG. Importance of cryoturbation in redistributing organic carbon in permafrost-affected soils. Soil Sci Soc Am J. 2007;71:1335-42. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0414N>
29. Bockheim JG, Munroe JS. Organic carbon pools and genesis of alpine soils with permafrost: a review. Arctic Antarctic Alpine Res. 2014;46(4):987-1006. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.987>
30. Cherbunina MY, Karaevskaya ES, Vasil'chuk YK, Tananaev NI, Shmelev DG, Budantseva NA, Merkel AY, Rakitin AL, Mardanov AV, Brouchkov AV, Bulat SA. Microbial and geochemical evidence of permafrost formation at Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia. Front Earth Sci. 2021;9:739365. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.739365>
31. Chestnykh OV, Grabovskiy VI, Zamolodchikov DG. Estimate of the soil carbon stock of forested regions in Russia using databases of soil properties. Contemp Probl Ecol. 2022;15:731-40. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070071>
32. Dutta K, Schuur EAG, Neff JC, Zimov SA. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia. Glob Change Biol. 2006;12(12):2336-51. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x>
33. Faucherre S, Jørgensen CJ, Blok D, Weiss N, Siewert MB, Bang-Andreasen T, Hugelius G, Kuhry P, Elberling B. Short and long-term controls on active layer and permafrost carbon turnover across the Arctic. J Geophys Res Biogeosci. 2018;123:372-90. <https://doi.org/10.1002/2017JG004069>

34. Fedorov AN, Vasilyev NF, Torgovkin YI, Shestakova A, Varlamov S, Zheleznyak M, Shepelev V, Konstantinov P, Kalinicheva S, Basharin N, Makarov V, Ugarov I, Efremov P, Argunov R, Egorova L, Samsonova V, Shepelev A, Vasiliev A, Ivanova R, Galanin A, Lytkin V, Kuzmin G, Kunitsky V. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1 : 1,500,000. *Geosciences*. 2018;8(2):465. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120465>
35. Felden J, Möller L, Schindler U, Huber R, Schumacher S, Koppe R, Diepenbroek M, Glöckner FO. Pangaea – data publisher for earth & environmental science. *Sci Data*. 2023;347(10). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02269-x>
36. Fountain AG, Campbell JL, Schuur EAG, Stammerjohn SE, Williams MW, Ducklow HW. The disappearing cryosphere: impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss. *Biosciences*. 2012;62(4):405-15. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.11>
37. Gentsch N, Mikutta R, Alves RJE, Barta J, Capek P, Gittel A, Hugelius G, Kuhry P, Lashchinskiy N, Palmtag J, Richter A, Santruckova H, Schnecker J, Shibistova O, Urich T, Wild B, Guggenberger G. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic. *Biogeosciences*. 2015;12:4525-42. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4525-2015>
38. Gentsch N, Mikutta R, Shibistova O, Wild B, Schnecker J, Richter A, Urich T, Gittel A, Santruckova H, Barta J, Lashchinskiy N, Mueller CW, Fuss R, Guggenberger G. Properties and bioavailability of particulate and mineral-associated organic matter in Arctic permafrost soils, lower Kolyma region, Russia. *Eur J Soil Sci*. 2015;66:722-34. <https://doi.org/10.1111/ejss.12269>
39. Grosse G, Harden J, Turetsky M, McGuire AD, Camille P, Tarnocai C, From S, Schuur EAG, Jorgenson T, Marchenko S, Romanovsky V, Wickland KP, French N, Waldrop M, Bourgeau-Chavez L, Striegl RG. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *J Geophys Res*. 2011;116(G4):1-23. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
40. Harden JW, Koven CD, Ping C-L, Hugelius G, McGuire AD, Camill P, Jorgenson T, Kuhry P, Michaelson GJ, O'Donnell JA, Schuur EAG, Tarnocai C, Johnson K, Grosse G. Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing. *Geophys Res Lett*. 2012;39(15):L15704. <https://doi.org/10.1029/2012GL051958>
41. Hugelius G, Bockheim JG, Camill P, Elberling B, Grosse G, Harden JW, Johnson K, Jorgenson T, Koven CD, Kuhry P, Michaelson G, Mishra U, Palmtag J, Ping C-L, O'Donnell J, Schirrmeister L, Schuur EAG, Sheng Y, Smith LC, Strauss J, Yu Z. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region. *Earth Syst Sci Data*. 2013;5:393-402. <https://doi.org/10.5194/essd-5-393-2013>
42. Hugelius G, Kuhry P. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment. *Glob Biogeochem Cycles*. 2009;23(3):GB3006. <https://doi.org/10.1029/2008GB003419>
43. Hugelius G, Kuhry P, Tarnocai C. Ideas and perspectives: Holocene thermokarst sediments of the yedoma permafrost region do not increase the northern peatland carbon pool. *Biogeosciences*. 2016;13:2003-10. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2003-2016>
44. Hugelius G, Kuhry P, Tarnocai C, Virtanen T. Soil organic carbon pools in a periglacial landscape; a case study from the Central Canadian Arctic. *Permafr Periglac Proc*. 2010;21(1):16-29. <https://doi.org/10.1002/ppp.677>
45. Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden JW, Schuur EAG, Ping C-L, Schirrmeister L, Grosse G, Michaelson GJ, Koven CD, O'Donnell JA, Elberling B, Mishra U, Camill P, Yu Z, Palmtag J, Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*. 2014;11:6573-6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
46. Hugelius G, Virtanen T, Kaverin D, Pastukhov A, Rivkin F, Marchenko S, Romanovsky V, Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic. *J Geophys Res*. 2011;116:G03024. <https://doi.org/10.1029/2010JG001606>
47. Kizyakov AI, Korotaev MV, Wetterich S, Opel T, Pravikova NV., Fritz M, Lupachev AV, Günther F, Shepelev AG, Syromyatnikov II, Fedorov AN, Zimin MV, Grosse G. Characterizing Batagay megaslump topography dynamics and matter fluxes at high spatial resolution using a multidisciplinary approach of permafrost field observations, remote sensing and 3D geological modeling. *Geomorphology*. 2024;455:109183. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109183>
48. Kuhry P, Grosse G, Harden JW, Hugelius G, Koven C, Ping C, Schirrmeister L, Tarnocai C. Characterisation of the permafrost carbon pool. *Permafr Periglac Process*. 2013;24:146-55. <https://doi.org/10.1002/ppp.1782>
49. Li J, Yuan J, Ciais P, Kang H, Freeman C, Huang Y, Dong Y, Liu D, Li Y, Ding W. Two decades of improved wetland carbon sequestration in northern mid-to-high latitudes are offset by tropical and southern declines. *Nat Ecol Evol*. 2025;9:1861-72. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02809-1>
50. Lopez CML, Hatano R, Guggenberger G, Ohta T, Gerasimov E, Fedorov AN. Forest fires effects on carbon stocks and soil chemistry in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Euras J For Res* 2012;15:9-17. URL: [https://www.researchgate.net/publication/277049532\\_Forest\\_Fires\\_Effects\\_on\\_Carbon\\_Stocks\\_and\\_Soil\\_Chemistry\\_in\\_Central\\_Yakutia\\_Eastern\\_Siberia](https://www.researchgate.net/publication/277049532_Forest_Fires_Effects_on_Carbon_Stocks_and_Soil_Chemistry_in_Central_Yakutia_Eastern_Siberia)
51. MacDonald GM, Kremenetski KV, Beilman DW. Climate change and the northern Russian treeline zone. *Philos Trans R Soc Lond*. 2008;363:2285-99. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2200>

52. Martens J, Mueller CW, Joshi P, Rosinger C, Maisch M, Kappler A, Bonkowski M, Schwamborn G, Schirrmeister L, Rethemeyer J. Stabilization of mineral-associated organic carbon in Pleistocene permafrost. *Nat Commun.* 2023;14:2120. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37766-5>
53. McBratney A, Mendonca Santos M, Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma.* 2003;117(1-2):3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
54. Molen MK, Huissteden J, Parmentier FJW, Petrescu AMR, Dolman AJ, Maximov TC, Kononov AV, Karsanaev SV, Suzdalov DA. The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia. *Biogeosciences.* 2007;4(6):985-1003. <https://doi.org/10.5194/bg-4-985-2007>
55. Myers-Smith IH, Kerby JT, Phoenix GK, Bjerke JW, Epstein HE, Assmann JJ, John C, Andreu-Hayles L, Angers-Blondin S, Beck PSA, Berner LT, Bhatt US, Bjorkman AD, Blok D, Bryn A, Christiansen CT, Cornelissen JHC, Cunliffe AM, Elmendorf SC, Forbes BC, Goetz SJ, Hollister RD, de Jong R, Loranty MM, Macias-Fauria M, Maseyk K, Normand S, Olofsson J, Parker TC, Parmentier F-JW, Post E, Schaepman-Strub G, Stordal F, Sullivan PF, Thomas HJD, Tømmervik H, Treharne R, Tweedie CE, Walker DA, Wilmsking M, Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nat Clim Chang.* 2020;10:106-17. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0688-1>
56. Olefeldt D, Goswami S, Grosse G, Hayes D, Hugelius G, Kuhry P, McGuire AD, Romanovsky VE, Sannel ABK, Schuur EAG, Turetsky MR. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nat Commun.* 2016;7:13043. <https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
57. Palmtag J, Obu J, Kuhry P, Siewert M, Weiss N, Hugelius G. A high spatial resolution soil carbon and nitrogen dataset for the northern permafrost region based on circumpolar land cover upscaling. *Earth Syst Sci Data.* 2022;14:4095-110. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4095-2022>
58. Parisien MA, Parks SA, Miller C, Krawchuk MA, Heathcott M, Moritz MA. Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems.* 2011;14:1141-55. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9474-2>
59. Park H, Launiainen S, Konstantinov PY, Iijima Y, Fedorov AN. Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *J Geophys Res Biogeosci.* 2018;123:1-17. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
60. Ping CL, Michaelson GJ, Jorgenson MT, Kimble JM, Epstein H, Romanovsky VE, Walker DA. High stocks of soil organic carbon in the North American region. *Nat Geosci.* 2008;1:615-19. <https://doi.org/10.1038/ngeo284>
61. Ping CL, Michaelson GJ, Kimble JM, Romanovsky VE, Shur YL, Swanson DK, Walker DA. Cryogenesis and soil formation along a bioclimate gradient in Arctic North America. *J Geophys Res.* 2008;113:G03S12. <https://doi.org/10.1029/2008JG000744>
62. Rees WG, Hofgaard S, Boudreau S, Cairns DM, Harper K, Mamet S, Mathisen I, Swirad Z, Tutubalina O. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? *Glob Chang Biol.* 2020;26:3965-77. <https://doi.org/10.1111/gcb.15113>
63. Schirrmeister L, Grosse G, Kunitsky V, Magens D, Meyer H, Dereviagin A, Kuznetsova T, Andreev A, Babiy O, Kienast F, Grigoriev M, Overduin PP, Preusser F. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (western Laptev Sea coast, cape Mamontov Klyk). *Polar Res.* 2008;27:249-72. <https://doi.org/10.3402/polar.v27i2.6179>
64. Schirrmeister L, Grosse G, Schnelle M, Fuchs M, Krbetschek M, Ulrich M, Kunitsky V, Grigoriev M, Andreev A, Kienast F, Meyer H, Babiy O, Klimova I, Bobrov A, Wetterich S, Schwamborn G. Late quaternary paleoenvironmental records from the western Lena delta, Arctic Siberia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* 2011;299:175-96. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.045>
65. Schirrmeister L, Grosse G, Schwamborn G, Andreev A, Meyer H, Kunitsky VV, Kuznetsova T, Dorozhkina MV, Pavlova EY, Bobrov A, Oezen D. Late quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena delta, Russia): a multidisciplinary approach. *Polar Geography.* 2003;27:277-319. <https://doi.org/10.1080/789610225>
66. Schirrmeister L, Grosse G, Wetterich S, Overduin PP, Strauss J, Schurr EAG, Hubberten HW. Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic. *J Geophys Res.* 2011;116:G00M02. <https://doi.org/10.1029/2011jg001647>
67. Schirrmeister L, Siegert C, Kuznetsova TV, Kuzmina S, Andreev A, Kienast F, Meyer H, Bobrov A. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia. *Quat Internat.* 2002;89:97-118. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00083-0)
68. Schuur EAG, Abbott BW, Commane R, Ernakovich J, Euskirchen E, Hugelius G, Grosse G, Jones M, Koven C, Leshyk V, Lawrence D, Loranty MM, Mauritz M, Olefeldt D, Natali S, Rodenhizer H, Salmon V, Schadel C, Strauss J, Treat C, Turetsky M. Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *Annu Rev Environ Resour.* 2022;47:34371. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>
69. Schuur E, McGuire A, Schädel C, Grosse G, Harden JW, Hayes DJ, Hugelius G, Koven CD, Kuhry P, Lawrence DM, Natali SM, Olefeldt D, Romanovsky VE, Schaefer K, Turetsky MR, Treat CC, Vonk JE. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature.* 2015;520:171-79. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
70. Shepelev A, Fedorov A, Cherepanova A. Quantitative and qualitative composition of soil organic matter in samples of ice complex from Central Yakutia, Eastern Siberia. *Appl Environ Soil Sci.* 2018;2018:9302743. <https://doi.org/10.1155/2018/9302743>

71. Shepelev AG, Kizyakov A, Wetterich S, Cherepanova A, Fedorov A, Syromyatnikov I, Savvinov G. Sub-surface carbon stocks in Northern taiga landscapes exposed in the Batagay megaslump, Yana upland, Yakutia. *Land*. 2020;9(9):1-16. <https://doi.org/10.3390/land9090305>
72. Siewert MB, Hanisch J, Weiss N, Kuhry P, Maximov TC, Hugelius G. Comparing carbon storage of Siberian tundra and taiga permafrost ecosystems at very high spatial resolution. *J Geophys Res Biogeosci*. 2015;120:1973-94. <https://doi.org/10.1002/2015JG002999>
73. Siewert MB, Hugelius G, Heim B, Faucherre S. Landscape controls and vertical variability of soil organic carbon storage in permafrost-affected soils of the Lena river delta. *Catena*. 2016;147:725-41. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.048>
74. Stapel JG, Schwamborn G, Schirrmeister L, Horsfield B, Mangelsdorf K. Substrate potential of last interglacial to Holocene permafrost organic matter for future microbial greenhouse gas production. *Biogeosciences*. 2018;15:1969-85. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1969-2018>
75. Stolpmann L, Coch C, Morgenstern A, Boike J, Fritz M, Herzsuh U, Stoof-Leichsenring K, Dvornikov Y, Heim B, Lenz J, Larsen A, Walter Anthony K, Jones B, Frey K, Grosse G. First pan-Arctic assessment of dissolved organic carbon in lakes of the permafrost region. *Biogeosciences*. 2021;18:3917-36. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3917-2021>
76. Strauss J, Schirrmeister L, Grosse G, Wetterich S, Ulrich M, Herzsuh U, Hubberten H-W. The deep permafrost carbon pool of the yedoma region in Siberia and Alaska. *Geophys Res Lett*. 2013;40:6165-70. <https://doi.org/10.1002/2013GL058088>
77. Strauss J, Schirrmeister L, Mangelsdorf K, Eichhorn L, Wetterich S, Herzsuh U. Organic-matter quality of deep permafrost carbon – a study from Arctic Siberia. *Biogeosciences*. 2015;12:2227-45. <https://doi.org/10.5194/bg-12-2227-2015>
78. Strauss J, Schirrmeister L, Wetterich S, Borchers A, Davydov SP. Grain-size properties and organic-carbon stock of yedoma ice complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia. *Glob Change Biol*. 2012;26(3):GB3003. <https://doi.org/10.1029/2011GB004104>
79. Sun T, Ocko IB, Hamburg SP. The value of early methane mitigation in preserving Arctic summer sea ice. *Environ Res Lett*. 2022;17(4):044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4f10>
80. Tarnocai C, Canadell JG, Schuur EAG, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochem. Cycles*. 2009;23:GB2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
81. Turetsky MR, Abbott BW, Jones MC, Walter Anthony K, Olefeldt D, Schuur EAG, Grosse G, Kuhry P, Hugelius G, Koven C, Lawrence DM, Gibson C, Sannel ABK, McGuire AD. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nat Geosci*. 2020;13:138-43. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
82. Uhlirva E, Santruckova H, Davidov SP. Quality and potential biodegradability of soil organic matter preserved in permafrost of Siberian tussock tundra. *Soil Biol Biochem*. 2007;39:1978-89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.018>
83. Ulrich M, Matthes H, Schmidt J, Fedorov AN, Schirrmeister L, Siegert C, Schneider B, Strauss J, Zielhofer C. Holocene thermokarst dynamics in Central Yakutia – A multi-core and robust grain-size endmember modeling approach. *Quat Sci Rev*. 2019;218:10-33. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.06.010>
84. Vasil'chuk Y.K, Ginzburg AP. Lateral and radial differentiation of cryogenic soil chemical composition in the Vilyuy river valley, Central Yakutia. *Moscow Univ. Soil Sci Bull*. 2024;79(1):34-48. <https://doi.org/10.3103/S0147687424700339>
85. Walter Anthony KM, Schneider von Deimling T, Nitze I, Frolking S, Emond A, Daanen R, Anthony P, Lindgren P, Jones B, Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nat Commun*. 2018;9:3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
86. Walter Anthony KM, Zimov SA, Grosse G, Jones MC, Anthony PM, Chapin FS, Finlay JC, Mack MC, Davydov S, Frenzel P, Frolking S. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. *Nature*. 2014;511:452-56. <https://doi.org/10.1038/nature13560>
87. Wang J, Wilson RS, Aristilde L. Electrostatic coupling and water bridging in adsorption hierarchy of biomolecules at water-clay interfaces. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2024;121(7):e2316569121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2316569121>
88. Weiss N, Blok D, Elberling B, Hugelius G, Jorgensen CJ, Siewert MB, Kuhry P. Thermokarst dynamics and soil organic matter characteristics controlling initial carbon release from permafrost soils in the Siberian yedoma region. *Sediment Geol*. 2015;348:38-48. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.12.004>
89. Wetterich S, Tumskey V, Rudaya N, Andreev AA, Opel T, Meyer H, Schirrmeister L, Hüls M. Ice complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 interstadial. *Quat Sci Rev*. 2014;84:39-55. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.009>
90. Windirsch T, Grosse G, Ulrich M, Schirrmeister L, Fedorov AN, Konstantinov P, Fuchs M, Jongejans LL, Wolter J, Opel T, Strauss J. Organic carbon characteristics in ice-rich permafrost in alas and yedoma deposits, central Yakutia, Siberia. *Biogeosciences*. 2020;17:3797-814. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3797-2020>
91. Wu T, Wang D, Mu C, Zhang W, Zhu X, Zhao L, Li R, Hu G, Zou D, Chen J, Wei X, Wen A, Shang C, La Y, Lou P, Ma X, Wu X. Storage, patterns, and environmental controls of soil organic carbon stocks in the

- permafrost regions of the Northern hemisphere. *Sci Total Environ.* 2022;828:154464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154464>
92. Xu L, Myneni R, Chapin F, Callaghan TV, Pinzon JE, Tucker CJ, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tommervik H, Euskirchen ES, Forbes BC, Piao SL, Anderson BT, Ganguly S, Nemani RR, Goetz SJ, Beck PSA, Bunn AG, Cao C, Stroeve JC. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nat Clim Chang.* 2013;3:581-86. <https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
  93. Zibulski R, Herzschuh U, Pestryakova LA, Wolter J, Müller S, Schilling N, Wetterich S, Schirrmeister L, Tian F. River flooding as a driver of polygon dynamics: modern vegetation data and a millennial peat record from the Anabar river lowlands (Arctic Siberia). *Biogeosciences.* 2013;10:5703-28. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4067-2013>
  94. Zimov SA, Davydov SP, Zimova GM, Davydova AI, Schuur EAG, Dutta K, Chapin FS. Permafrost carbon: stock and decomposability of a globally significant carbon pool. *Geophys Res Lett.* 2006;33:L20502. <https://doi.org/10.1029/2006GL027484>
  95. Zubrzycki S, Kutzbach L, Grosse G, Desyatkin A, Pfeiffer E-M. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena river delta. *Biogeosciences.* 2013;10(6):3507-24. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3507-2013>
  96. Zubrzycki S, Kutzbach L, Pfeiffer E-M. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic. *Solid Earth.* 2014;5:595-609. <https://doi.org/10.5194/se-5-595-2014>

Статья опубликована  
на сайте журнала Биосфера  
до верстки и корректуры  
как принятая к печати в № 3 за 2026 год.  
В окончательной версии возможны изменения.