ЛЕСОВЕДЕНИЕ, 2022, № 3, с. 227–238

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 630.182.5+574.47

# ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ РАЙОНОВ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗ ДАННЫХ ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК[1]

© 2022 г. О. В. Честных[a, b, *], В. И. Грабовский[a], Д. Г. Замолодчиков[a, c]

[a]Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117234 Россия

[b]МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

[c]Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, Москва, 109028 Россия

*E-mail: ochestn@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2021 г.
После доработки 24.11.2021 г.
Принята к публикации 02.02.2022 г.

**Актуальность и цели.** Почва – один из ключевых пулов углерода наземных экосистем. По последним данным, пул почвенного углерода лесных экосистем может быть значительно недооценен. В связи с этим особую актуальность приобретает получение надежно интерполированных данных по углероду лесных почв на географические площадные контуры. В работе имеющиеся данные по запасам углерода почв агрегированы по лесным районам, официально утвержденным эколого-административным пространственным единицам. Лесные районы послужили топологической основой для экстраполяции выборочных данных на всю территорию соответствующего района и лесных земель в целом. Непосредственной задачей данной работы является интерполяция данных почвенных разрезов по слоям почвенной толщи по лесным районам. **Объекты и методы.** Основой для расчетов запасов углерода в почвах лесов и тундр России послужила база данных, которая объединяет информацию о почвенных разрезах из 300 литературных источников. Для определения пространственной дифференциации средних значений все присутствовавшие в базе разрезы распределены по лесным районам через их координаты. Установлены принадлежность каждого разреза к лесному району, а по описаниям разрезов – к биотопу. Всего отобрано 1405 почвенных разрезов, содержащих все необходимые для анализа данные: координаты, расчетные данные по содержанию углерода на различных почвенных уровнях, а также данные о биотопе, в котором проводился разрез. **Результаты.** Регрессионный анализ связи запасов почвенного углерода с биотопами и лесными районами подтвердил адекватность выделенной картографической основы для интерполяции, чем подтвердил обоснованность выбора топологической основы для интерполяции почвенных данных. Получены суммарные и средние запасы почвенного углерода для площади $1368 \times 10^6$ га лесных районов России. **Выводы.** Суммарно для России запасы $C_{soil}$ в слоях 0–30 см, 0–50 см и 0–100 см оценены в $128.4 \times 10^9$ т С, $166.5 \times 10^9$ и $215.8 \times 10^9$ т С. Для слоя 0–100 см средние запасы – $162 \pm 23$ т С га$^{-1}$, оценки представлены средними значениями ±SE (стандартной ошибкой). Получены карты распределения запасов углерода для лесных районов России в отношении разных глубин разрезов.

*Ключевые слова: земли лесного фонда России, лесообразующие породы, база данных, лесные почвы, запасы почвенного биологического углерода* ($C_{soil}$).

**DOI:** 10.31857/S0024114822030056

Проблема глобального потепления климата стимулировала научный интерес к оценке запасов углерода для природных зон, стран, частей континентов. В арктических, бореальных и умеренных экосистемах значительная часть углерода содержится в органическом веществе почвы, поэтому территориальные расчеты запасов почвенного углерода стали популярным направлением исследований. Известны оценки суммарного пула углерода, опубликованные в начале 1990-х годов (Vinson, Kolchugina, 1993; Орлов и др., 1996; Рожков и др., 1997; Stolbovoi, Mccallum, 2002; Щепащенко и др., 2013). Представлены оценки запасов углерода почв для регионального (Титлянова и др., 2007; Пастухов, Каверин, 2013; Чернова и др., 2020), биомного (Честных и др., 1999; Честных, Замолодчиков, 2004; Честных и др.,

[1] Работа выполнена в рамках темы научного проекта государственного задания МГУ № 121032500094-5 “Построение концептуальных и математических моделей зональных типов наземных экосистем” (анализ базы данных) и при поддержке РНФ № 19-77-30015 (оценка запасов углерода).

2004a; Stolbovoi, 2006) и интразонального (Ефремова и др., 1997) уровней. В составе экосистемных оценок углеродных пулов почва рассматривается в работах (Алексеев, Бердси, 1994; Уткин и др., 2001; Shvidenko, Nilsson, 2003, Замолодчиков и др., 2005; Замолодчиков и др., 2011; Швиденко, 2014, Чернова и др, 2021).

Почва – один из ключевых пулов углерода наземных экосистем. В последнее время появились данные о том, что пул почвенного углерода лесных экосистем может быть значительно недооценен (Sothe et al., 2021). В связи с этим особую актуальность приобретает получение надежных данных по углероду лесных почв в пересчете на географические площадные контуры. Стандартный подход для интерполяции данных почвенных разрезов на площади состоит в выборе картографической основы, используемой для получения значений площадей тех или иных контуров, в пределах которых предполагается наличие закономерно однородных запасов углерода почвы. Контуры могут быть выбраны по картам типов почв (Орлов и др., 1996; Рожков и др., 1997), ландшафтов (Честных и др, 1999) и растительных ассоциаций (Vinson, Kolchugina, 1993), материалам учета лесного фонда (Уткин и др., 2001; Честных и др., 2004). Последнее время выбор топографической основы все больше и чаще останавливается на продуктах дистанционного зондирования (Пастухов, Каверин, 2013; Щепащенко и др., 2013).

В пределах выбранных контуров оцениваются средние значения запасов углерода почвы. Это может быть сделано либо с использованием баз данных, сформированных на основе анализа почвенных разрезов, либо с использованием типовых значений запасов углерода для разных категорий почв (Чернова и др., 2020). Одна из таких баз типовых почвенных профилей, приведенная в цифровом источнике (Stolbovoi, Mccallum, 2002). Эта база содержит 254 типовых профиля почвы и используется для расчетов эталонных значений запасов углерода для типов почвы (Stolbovoi, 2002, 2006). Эти же почвенные профили были использованы и для более поздней оценки запасов углерода почвы (Щепащенко и др., 2013). Тем не менее, даже наиболее современные по времени расчеты запасов углерода почв России основываются на ограниченном наборе почвенных профилей. В силу высокой вариабельности профиля почвы (Рыжова, Подвезенная, 2008, Чернова и др., 2020, 2021), ограниченное количество профилей потенциально приводит к высоким смещениям площадных оценок запасов углерода и других элементов в почвах.

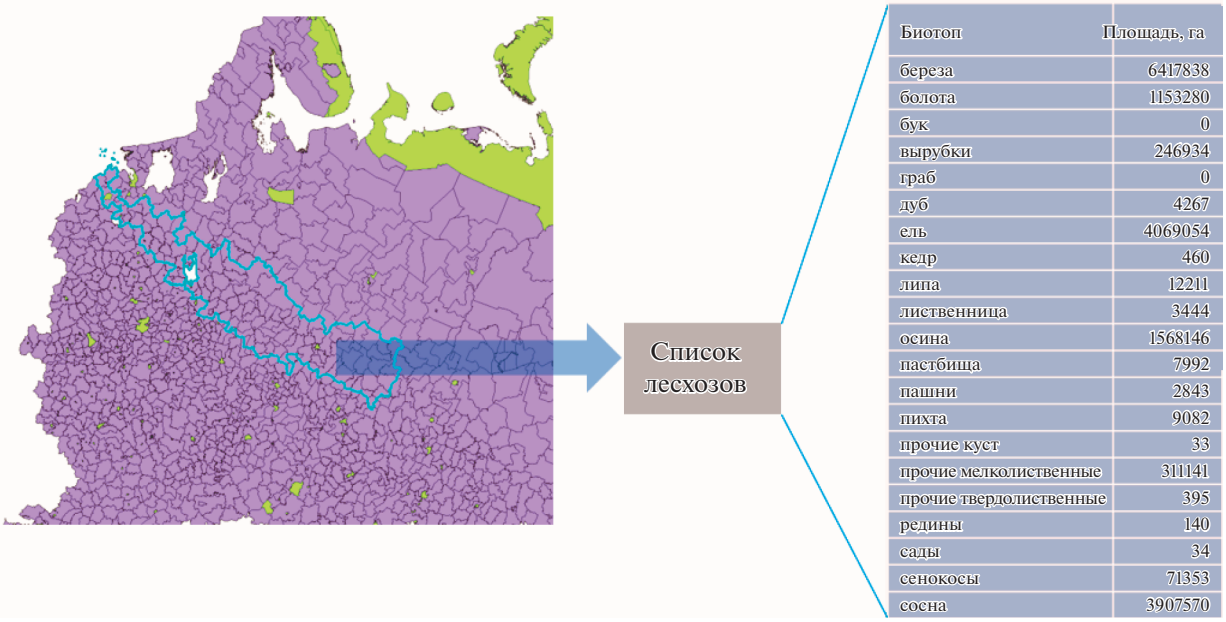
В предлагаемой работе произведены оценки запасов углерода, представленные с учетом распространенности в регионе местообитаний, в которых произведен каждый почвенный разрез. В целом для всей территории России использовано 1405 средних типовых значений почвенных профилей, которые никак не пересекались при вычислении средних типовых значений содержания почвенного углерода. Такой подход позволяет получить уточненные оценки запасов углерода.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Имеющиеся данные по запасам углерода почв были агрегированы по лесным районам, официально утвержденным эколого-административным пространственным единицам (приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 18 августа 2014 г. № 367). Лесные районы послужили картографической основой для экстраполяции выборочных данных на всю территорию соответствующего района и лесных земель в целом. Такой подход облегчает использование данных по оценкам запасов почвенного углерода в оценках углеродного бюджета региональных экосистем.

Непосредственной задачей данной работы является экстраполяция данных почвенных разрезов по слоям почвенной толщи (0–30, 0–50, 0–100 см) по лесным районам.

Двумя авторами настоящей работы ранее по материалам открытых публикаций была создана база данных “Почвенные характеристики Северной Евразии” (Честных, Замолодчиков, 2004, 2018). База данных объединяет информацию около 1500 почвенных разрезов из 300 литературных источников. В ней более представлены почвенные разрезы, заложенные в лесах, добавлены описания разрезов для других категорий земель – тундр, лугов, степей, пастбищ, пашен, садов. В последней версии базы существенно изменена структура, для отсутствующих значений тех или иных параметров добавлены расчетно-экспертные оценки, что позволило включить ранее не использовавшуюся информацию в расчет. Для этого была разработана процедура расчета запасов вещества для профилей, в которых имелись пропуски среди горизонтов либо отсутствие стыковки глубин горизонтов. Эта процедура заполняет пропуск в равной пропорции величинами, приведенными в описании для вышележащего и нижележащего горизонтов. В представленной базе проводилась оценка запасов органического углерода в почвах России, к тому же методологически максимально совместимая с данными о запасах углерода в других пулах биогеоценозов. По каждому разрезу имеется подробная информация (около 40 параметров): географическое положение, строение почвенного профиля, физико-химические свойства почв, механический состав, валовый химический состав, содержание органики по всем выделенным горизонтам. По имеющейся в базе информации, связанной с объемным весом поч-




| Биотоп | Площадь, га |
|---|---|
| береза | 6417838 |
| болота | 1153280 |
| бук | 0 |
| вырубки | 246934 |
| граб | 0 |
| дуб | 4267 |
| ель | 4069054 |
| кедр | 460 |
| липа | 12211 |
| лиственница | 3444 |
| осина | 1568146 |
| пастбища | 7992 |
| пашни | 2843 |
| пихта | 9082 |
| прочие куст | 33 |
| прочие мелколиственные | 311141 |
| прочие твердолиственные | 395 |
| редины | 140 |
| сады | 34 |
| сенокосы | 71353 |
| сосна | 3907570 |

**Рис. 1.** Пример расчета площадей биотопов южно-таежного лесного района.

венных горизонтов, были оценены значения объемной массы для всех почвенных горизонтов, используя регрессионные уравнения, в которых учитывалась глубина залегания горизонта, процентное содержание в нем гумуса, группы типов почв, группы подстилающих пород, географическая подзона.

База служила основой для расчетов запасов углерода и азота в почвах лесов и тундр России (Честных, Замолодчиков, 2017). Расчеты типовых значений углерода почвы выполнены на основе этой базы. Всего отобрано 1405 почвенных разрезов, содержащих все необходимые для анализа данные: координаты, расчетные данные по содержанию углерода на различных почвенных уровнях (в слоях 0–30, 0–50 и 0–100 см), а также данные о биотопе, в котором проводился разрез.

Вторым источником информации является база данных Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) от 2008 г. Это последняя база с представительством отдельных лесхозов. В ЦЭПЛ РАН в 2000-е годы в рамках проектов Минприроды РФ и Рослесхоза создавались ГИС-слои лесхозов и лесных районов для статистического и пространственного анализа данных ГУЛФ. По ГУЛФ 2008 рассчитаны доли площадей лесных земель разных категорий как для покрытых лесной растительностью земель, так и для не покрытых лесной растительностью лесных и нелесных земель (вырубки, редины, луга, пашни и т.д.). Методом “Пространственного соединения” из инструментария ArcGIS получены списки лесхозов, составляющих лесные районы. По этим спискам и долям площадей составлены доли земель различных категорий для лесных районов.

Категориям земель из ГУЛФ (для краткости будем называть их “биотопы”) были сопоставлены описания местообитаний проведения почвенных разрезов. Всего таких биотопов 22. В качестве источника картографических материалов были использованы шейп-файлы лесных районов и лесхозов для территории России. Всего эта территория представлена 31 лесным районом и 1975 лесхозами. Средствами ArcGis получены суммарные площади интересующих нас биотопов в каждом лесном районе (рис. 1).

По имеющимся координатам каждому почвенному разрезу был присвоен код лесного района, в котором находится разрез. Таким образом, исходная база для расчетов включала поля кода лесного района, биотоп и собственно 3 поля с данными о содержании углерода в разных слоях почвы. На основе этих данных были рассчитаны средние удельные показатели содержания углерода в почве для каждого лесного района и для каждого биотопа, а также рассчитаны их статистические ошибки.

Для оценки связи между удельными запасами почвенного углерода с биотопами и лесными районами был проведен регрессионный анализ. Оценена система с зависимой переменной удельного содержания углерода в почве и независимых переменных – двух взаимодействующих факторов: лесных районов и биотопов. То есть, была построена двухфакторная линейная регрессионная модель с факторными переменными. Расчеты

были произведены при помощи базовой функции линейной модели lm( ) в R.

На следующем этапе полученные удельные средние значения содержания углерода в почвах были умножены на площади соответствующих биотопов в соответствующих лесных районах, и, таким образом, получены суммарные показатели содержания углерода в почвах учтенных биотопов соответствующих лесных районов. Для того, чтобы получить оценки по всей площади лесных районов (ЛР), был рассчитан коэффициент пересчета на всю площадь ЛР. Получен он следующим образом. Площади биотопов по каждому лесному району рассчитаны как суммы площадей соответствующих биотопов по лесным районам (см. рис. 1). Полученные площади биотопов лесных районов сопоставили с общей площадью лесных районов, рассчитанной из шейп-файлов. Отношение этих величин (площади по суммам площадей биотопов и общей площади ЛР) дало нам искомый коэффициент. Иными словами, этот коэффициент позволяет компенсировать недостающую из сумм биотопов площадь лесного района. Этот недостаток обусловлен, во-первых, существованием земель, не относящихся к землям лесного фонда и, во-вторых, биотопов, в которых не проводились исследования почв. Результатом применения коэффициента пересчета является таблица суммарного содержания углерода в лесных районах РФ. Расчеты проводились в среде R и ArcGis 10.4.

Настоящая работа базируется на результатах обработки базы данных лишь в отношении одного из почвенных элементов, а именно, углерода. Для пересчета запасов гумуса в углерод использован единый коэффициент 0.57 (Кобак, 1988). Оценка запаса по профилю включает как углерод органического вещества почвы в верхних горизонтах, которые могут быть отнесены к подстилке, так и в заторфованных горизонтах подзолисто-болотных почв. Таким образом, суммарная оценка для профиля включает запасы органического углерода подстилки, органогенных и минеральных горизонтов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, произведем оценку адекватности предложенной картографической основы для интерполяции данных почвенных разрезов. Для этого оценим величину связи между удельным содержанием органического углерода в почвах и предложенной картографической основой. Сделаем это посредством регрессионного анализа связи в модели вида:

$$C_{soil} = a + bF + cB + dFB, \quad (1)$$

где $C_{soil}$ – удельное содержание углерода в почве, $F$ и $B$ – факторные переменные с 31 и 22 уровнями (лесные районы и биотопы соответственно), $a$ – свободный член, а $b$, $c$, $d$ – коэффициенты уравнения.

Результаты применения линейной модели lm() показали наличие достоверной на уровне $P < 0.05$ и выше связи $C_{soil}$ с 7 уровнями фактора $F$ (лесными районами), 10 уровнями фактора B (биотопами) и с 25-ю их сочетаниями. Скорректированная величина $R^2 = 0.41$ может быть достаточным обоснованием адекватности выбора картографической основы. Очевидно, что в силу инертности почв как углеродного пула и динамичности смен биотопов (лесные биотопы, например, превращаются в вырубку или гарь за один сезон) трудно ожидать особо сильную связь между параметрами.

В табл. 1 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода для лесных районов Европейско-Уральской части России. Рассматривая выборки средних в целом по лесным районам вне их биотопической привязки, можно отметить, что наибольшее количество данных в районе степей – 124, хвойно-широколиственных лесов – 119 и Северо-Кавказском районе – 117, при этом относительные ошибки средних резко уменьшаются, т.к. увеличивается число разрезов на каждую полосу. Разброс относительных ошибок средних для всех районов – 5–30%.

Максимальные средние значения наблюдаются в притундровом и Северо-таежном районах, а также в Северо-Уральском районе. Минимальные – в хвойно-широколиственном районе, где небольшая представленность нелесных земель. Наиболее высокие средние значения 466 т С га$^{-1}$ свойственны почвам Северо-Уральского и северо-таежного – 271 т С га$^{-1}$ районов, где в расчеты попадают заболоченные земли. Минимальные средние значения в 64 т С га$^{-1}$ рассчитаны для хвойно-широколиственного района и в 80 т С га$^{-1}$ – для района степей, что, возможно, объясняется либо засушливыми территориями, либо тем, что большая часть биома степей распахана, и, таким образом, участки с большим средним значением попадают в категорию “пашни”. Для региона пустынь данные не приведены вовсе, т.к. они не присутствуют в базе. Интерес представляют данные по Северо-Кавказскому району, где при общей небольшой площади в 2.23 млн га, т.е. одному из самых маленьких выделов, средние значения достигают значительных величин 112 т С га$^{-1}$ и дают суммарные запасы в 250 × 10$^6$ т С, что объясняется наличием большого количества пашен в этом регионе. Оценены запасы углерода в почвах тундровой зоны, для глубины 0–30 см – 26 × 10$^6$ т С, для 0–50 см – 33 × 10$^6$ т С, для 0–100 см – 41 × 10$^6$ т С.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Европейско-Уральской части составили

**Таблица 1.** Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Европейско-Уральской части России

| Район | Площадь $10^6$ га | Слой, см | | | | | | Число разрезов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0–30 см | | 0–50 см | | 0–100 см | | |
| | | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | |
| Тундры | 0.2 | 26 | 105 ± 75 | 33 | 134 ± 111 | 41 | 167 ± 156 | 60 |
| Район притундровых лесов и редкостойной тайги | 23 | 3474 | 149 ± 42 | 5286 | 226 ± 73 | 6122 | 262 ± 87 | 53 |
| Северо-таежный район | 35 | 4940 | 141 ± 57 | 7204 | 205 ± 88 | 9526 | 271 ± 123 | 57 |
| Средне-таежный район | 32 | 2920 | 92 ± 29 | 3629 | 114 ± 32 | 4934 | 155 ± 43 | 37 |
| Южно-таежный район | 18 | 2090 | 118 ± 101 | 2334 | 131 ± 112 | 2568 | 144 ± 120 | 34 |
| Район хвойно-широколиственных лесов | 23 | 1020 | 44 ± 29 | 1177 | 51 ± 31 | 1480 | 64 ± 34 | 119 |
| Лесостепной район | 5 | 272 | 55 ± 36 | 358 | 72 ± 49 | 470 | 94 ± 59 | 26 |
| Район степей | 3 | 96 | 38 ± 13 | 134 | 53 ± 18 | 200 | 80 ± 27 | 124 |
| Северо-кавказский горный район | 2 | 135 | 61 ± 28 | 179 | 80 ± 36 | 250 | 112 ± 45 | 117 |
| Северо-уральский район | 12 | 2544 | 204 ± 31 | 4120 | 331 ± 39 | 5812 | 466 ± 49 | 17 |
| Средне-уральский район | 20 | 1243 | 63 ± 21 | 1511 | 77 ± 26 | 1967 | 100 ± 33 | 20 |
| Южно-уральский район | 8 | 542 | 69 ± 3 | 640 | 82 ± 8 | 801 | 102 ± 16 | 11 |
| **Всего** | **181** | **19303** | 95 ± 39 | **26603** | 130 ± 52 | **34170** | 168 ± 66 | 675 |

Примечание. Оценки в т С га$^{-1}$ представлены средневзвешенными оценками ± SE (стандартной ошибкой).

для глубины 0–30 см 19303 × $10^6$ т С, для 0–50 – 26603 × $10^6$ т С, для 0–100 см – 34170 × $10^6$ т С. Общая площади земель лесного фонда в европейской части России для этих лесных районов оценена в 181.13 × $10^6$ га.

В табл. 2 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода в слоях почвы 0–100, 0–50, 0–30 см для лесных районов Западной и Восточной Сибири. Максимальный запас углерода приходится на два основных района – Алтае-Саянский горно-таежный район и Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район, занимающие максимальные площади 129 и 193 × $10^6$ га соответственно. При этом Западно-Сибирский равнинный таежный и Восточно-Сибирский район притундровых лесов представлены максимальным количеством разрезов, что можно объяснить большей доступностью территории. Рассматривая региональные оценки запасов углерода, необходимо отметить, что в Западной Сибири задействовано 238 разрезов при площади 327 × $10^6$ га, в Восточной – 273 разрезов, общая площадь 528 × $10^6$ га.

В целом средние величины запасов почвенного углерода по Западной Сибири чуть больше таковых для Восточной, особенно там, где сосредоточены основные массивы болот. Средние и по болотам, и по гарям, и по сосновым насаждениям в первом случае больше. Но при итоговых расчетах эти превышения нивелируются именно распределением площадей, т.к. Восточная Сибирь представлена гораздо большими территориями.

При территории всей Сибири в 856 млн га общий запас почвенного углерода в слое 0–100 см в Западной Сибири оценивается нами в 56226 × $10^6$ т С углерода. При этом гораздо большая часть, 72904 × $10^6$ т С, располагается в Восточной Сибири.

Нелесные земли в структуре земель лесного фонда в Сибири могут выступать главным аккумулятором биологического углерода во всем биоме бореальных лесов. При этом $C_{soil}$ болот и определяет приоритеты отдельных регионов в общих запасах углерода лесного фонда, а не только его нелесных земель.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Сибири составили для глубины 0–30 см – 82069 × $10^6$ т С, для 0–50 см – 101405 × $10^6$ т С, для 0–100 см – 129130 × $10^6$ т С. Общая площадь земель лесного фонда для лесных районов Сибири оценена в 855 × $10^6$ га.

В табл. 3 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода в слоях почвы для лесных районов Дальнего Востока. Наиболее представительны два лесных района – Камчатский и Дальневосточный таежный, т.к. первый из них представлен максимальным количеством разрезов, 91 при достаточно большой площади 131 × $10^6$ га, второй представлен 37 разрезами, общая площадь района небольшая,

**Таблица 2.** Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Западной и Восточной Сибири России

| Лесной район | Площадь $10^6$ га | Слой, см | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0–30 | | 0–50 | | 0–100 | | |
| | | $10^6$ т С | т С $га^{-1}$ | $10^6$ т С | т С $га^{-1}$ | $10^6$ т С | т С $га^{-1}$ | |
| **Западная Сибирь** | | | | | | | | |
| Западно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги | 15 | 1040 | 67 ± 7 | 1108 | 72 ± 13 | 1256 | 81 ± 16 | 10 |
| Западно-Сибирский равнинный таежный район | 49 | 6726 | 138 ± 8 | 7444 | 153 ± 9 | 8658 | 178 ± 9 | 97 |
| Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район | 92 | 7926 | 86 ± 5 | 9623 | 104 ± 7 | 11679 | 127 ± 8 | 64 |
| Алтае-Саянский горно-таежный район | 129 | 15358 | 119 ± 10 | 20102 | 156 ± 13 | 26685 | 207 ± 16 | 59 |
| Алтае-Саянский горнолесостепной район | 42 | 5700 | 135 ± 30 | 6770 | 160 ± 34 | 7948 | 188 ± 34 | 8 |
| **Всего по Западной Сибири** | **327** | **36750** | 112 ± 5 | **45047** | 137 ± 6 | **56226** | 172 ± 6 | **238** |
| **Восточная Сибирь** | | | | | | | | |
| Среднесибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги | 70 | 6222 | 89 ± 25 | 8253 | 118 ± 29 | 10368 | 149 ± 29 | 20 |
| Среднесибирский плоскогорный таежный район | 66 | 11666 | 176 ± 60 | 13423 | 203 ± 57 | 15697 | 237 ± 65 | 10 |
| Приангарский район | 114 | 8988 | 79 ± 29 | 11384 | 100 ± 31 | 15233 | 134 ± 33 | 14 |
| Среднесибирский подтаежно-лесостепной район | 46 | 3980 | 86 ± 59 | 4981 | 108 ± 72 | 6177 | 134 ± 81 | 62 |
| Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги | 24 | 1463 | 62 ± 31 | 2077 | 88 ± 42 | 2933 | 124 ± 55 | 94 |
| Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район | 193 | 12322 | 64 ± 46 | 15489 | 80 ± 51 | 21595 | 112 ± 59 | 44 |
| Байкальский горный лесной район | 15 | 678 | 46 ± 27 | 751 | 50 ± 27 | 901 | 61 ± 25 | 29 |
| **Всего по Восточной Сибири** | **528** | **45319** | 86 ± 3 | **56358** | 107 ± 4 | **72904** | 138 ± 4 | **273** |
| **Всего по Сибири** | **855** | **82069** | 96 ± 3 | **101405** | 119 ± 3 | **129130** | 151 ± 4 | **511** |

Примечание. Оценки в т С $га^{-1}$ представлены средневзвешенными оценками ±SE (стандартной ошибкой).

$24 \times 10^6$ га, но по общим запаса почвенного органического углерода это максимальные значения.

Высокие средние значения запаса почвенного углерода в Камчатском и Дальневосточном таежном районах обязаны, главным образом, дальневосточным каменноберезнякам, связанным с глубокогумусными луговыми почвами. В региональном отношении менее контрастны показатели для мягколиственных насаждений. Очень высокие средние запасы для категории “прочие кустарники” связаны с преобладанием в ней по площади зарослей кедрового стланика и притундровых кустарников. Также можно отметить сенокосы, которые характеризуются богатыми луговыми почвами.

Наибольшие средние запасы свойственны Дальневосточному таежному району, наименьшие – лесостепным Забайкальскому и Дальневосточному районам. Переходные значения средних – в Камчатском районе и Дальневосточном районе притундровых лесов и редкостойной тайги. При общей площади земель лесного фонда ~$1110 \times 10^6$ га распределение между категориями покрытых лесом, не покрытых лесом и нелесных земель равно соответственно 65, 9 и 26%. В пределах отдельных регионов это соотношение существенно меняется. На Дальнем Востоке увеличение доли площади в лесном фонде не покрытых лесом земель обусловлено значительным распространением гарей и вырубок.

Получены карты распределения запасов углерода для Дальнего Востока России в отношении разных глубин разрезов. Эти данные, очевидно, отражают распределение площадей по лесным районам, в самом большом по площади Камчатском районе ($131 \times 10^6$ га) наблюдаются и самые высокие запасы $C_{soil}$ – $27710 \times 10^6$ т С. Как уже мы отмечали выше, в этом районе средние запасы по

**Таблица 3.** Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Дальнего Востока России

| Лесной район | Площадь, $10^6$ га | Слой, см | | | | | | Число разрезов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0–30 | | 0–50 | | 0–100 | | |
| | | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | |
| Забайкальский горномерзлотный район | 24 | 1880 | 79 ± 53 | 2179 | 92 ± 59 | 2622 | 110 ± 68 | 25 |
| Забайкальский лесостепной район | 36 | 1823 | 51 ± 0 | 2552 | 71 ± 0 | 3225 | 89 ± 0 | 1 |
| Дальневосточный район притундровых лесов и редкостойной тайги | 13 | 1156 | 92 ± 56 | 1516 | 120 ± 71 | 2042 | 162 ± 91 | 41 |
| Камчатский район | 131 | 12212 | 93 ± 49 | 19258 | 147 ± 74 | 27710 | 211 ± 98 | 91 |
| Дальневосточный таежный район | 24 | 2899 | 123 ± 66 | 3689 | 157 ± 80 | 4823 | 205 ± 83 | 37 |
| Приамурско-Приморский хвойно-широколиственный район | 87 | 5330 | 61 ± 12 | 7299 | 84 ± 20 | 9806 | 112 ± 36 | 11 |
| Дальневосточный лесостепной район | 16 | 1727 | 106 ± 8 | 2023 | 124 ± 8 | 2315 | 142 ± 9 | 13 |
| **Всего по Дальнему Востоку** | **331** | **27027** | 82 ± 21 | **38516** | 116 ± 31 | **52543** | 159 ± 41 | 219 |

Примечание. Оценки в т С га$^{-1}$ представлены средневзвешенными оценками ± SE (стандартной ошибкой).

биотопам также превышают все остальные выделы. Далее по запасам лидируют Приамурско-Приморский хвойно-широколиственный и Дальневосточный таежный районы, суммарные запасы соответственно 9806 и 4823 × $10^6$ т С.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Дальнего Востока составили для глубины 0–30 см – 27027 × $10^6$ т С, для 0–50 см – 38516 × $10^6$ т С, для 0–100 см – 52543 × $10^6$ т С. Общая площадь земель лесного фонда для этих лесных районов оценена в 331 × $10^6$ га.

В табл. 4 представлены все полученные региональные оценки и рассчитаны средние итоговые запасы почвенного углерода в разных почвенных слоях. Из четырех регионов – Европейско-Уральская часть, Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток – наибольшую площадь занимает Восточная Сибирь, и, несмотря на самые низкие значения средних запасов, именно ей свойственны самые большие запасы почвенного углерода. А самые меньшие – приходятся на Европейско-Уральский регион. Однако рассчитанные оценки средних значений существенно изменяют картину. Как уже отмечалось выше, самые большие значения средних типовых запасов отмечены именно для Западной Сибири с ее заторфованными территориями, на второе место в этом рейтинге выходит Европейско-Уральская часть с большим включением тундровых территорий, затем идет Дальний Восток с гумусированными луговыми почвами, а вот средние типовые значения почв Восточной Сибири оказываются самыми меньшими, на что, по-видимому, влияет и рельеф региона, и его криогенность.

При сравнении удельных значений можно отметить следующие моменты в региональном аспекте. А.З. Швиденко, Д.Г. Щепащенко оценивают средние значения запасов для Европейской и Азиатской частей страны, и в сравнении с нашими данными они варьируют по-разному. Для Европейской части они приводят данные в 163 т С га$^{-1}$, что почти совпадает с нашими оценками 168 т С га$^{-1}$, для Азиатской части расхождения более существенные – они приводят оценки 180 т С га$^{-1}$ против наших 155 т С га$^{-1}$. В целом по России ими получены средние запасы в метровом слое в 176 т С га$^{-1}$, наша же величина меньше – 162 т С га$^{-1}$. Как нам кажется, именно бóльшая площадь горных районов в криолитозоне Сибири с их меньшими удельными запасами и обеспечивают снижение этой величины, что и отражается в наших расчетах. А более пологий рельеф, меньшая площадь мерзлотных почв, приуроченных к северным тундровым территориям в Европейской части, дает меньшие расхождения в оценках.

Интерес представляют полученные средние значения запасов для представленных региональных территорий, которые позволяют перейти от гетерогенности лесных районов к более крупным

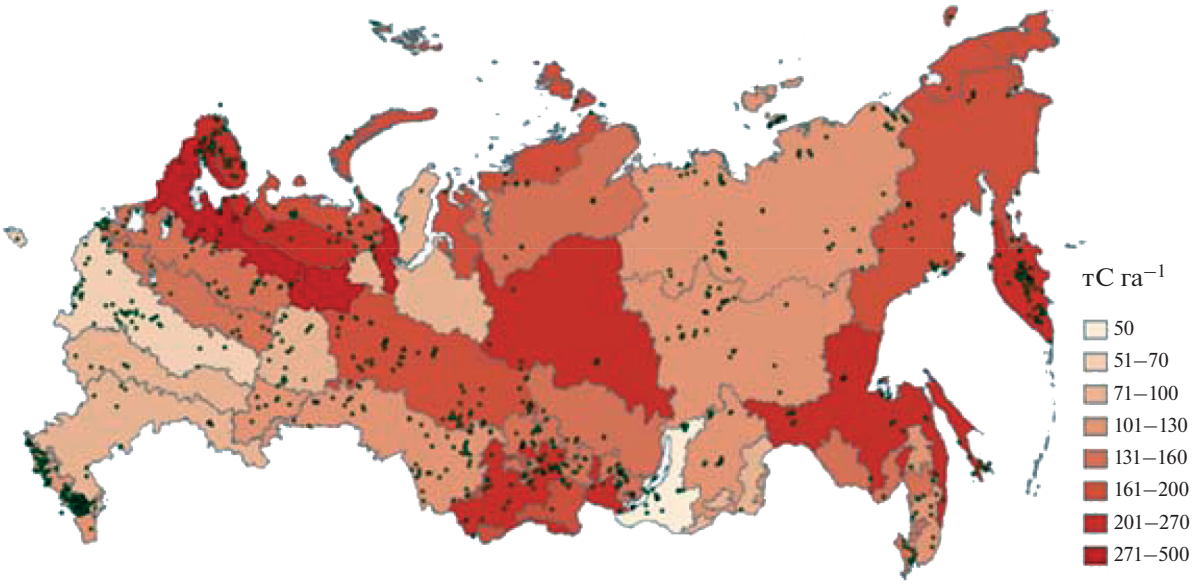



**Рис. 2.** Средние запасы углерода (т С га$^{-1}$) в слое почвы 0–100 см на землях лесного фонда Российской Федерации (точки – места почвенных разрезов).

оценкам, что будет полезно при составлении бюджета углерода в целом для России.

Получены суммарные и средние запасы почвенного углерода для площади 1367 × $10^6$ га лесных районов России. Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов России составили для глубины 0–30 см – 128.4 × $10^9$ т С, для 0–50 см – 166.5 × $10^9$ т С, для 0–100 см – 215.8 × $10^9$ т С.

На рис. 2 приведена карта распределения средних удельных запасов почвенного углерода в слое 0–100 см по лесным районам России.

Сравнение с нашими более ранними данными, представляемыми в виде 12 квадратов (три полосы – северная, средняя и южная, и 4 региона – Европейско-Уральская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток), вызывает некоторые трудности, прежде всего – из-за расхождений в площадях, т. к. в суммарную площадь лесных районов сейчас нами включены и северные лесные районы притундровых редколесий, а часть среднесибирского таежного района в прежних расчетах частично включалась в Дальний Восток, отчего суммарные площади существенно расходятся.

Однако если считать запас почвенного углерода в целом по России, то наблюдается хорошая сходимость результатов, особенно для слоев 0–30 и 0–50 см. Общая площадь новых расчетов составила 1367 млн га против 1110 млн га прежних расчетов, что связано с включением в расчет и тундровых территорий. Для слоя 0–30 см совпадение

**Таблица 4.** Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов России

| Район | Площадь, $10^6$ га | Слой, см | | | | | | Число разрезов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0–30 | | 0–50 | | 0–100 | | |
| | | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-1}$ | $10^6$ т С | т С га$^{-}$ | |
| Европейско-Уральская часть | 181 | 19303 ± 7495 | 95 ± 39 | 26603 ± 9954 | 130 ± 52 | 34170 ± 12505 | 168 ± 66 | 675 |
| Западная Сибирь | 327 | 36750 ± 1584 | 112 ± 5 | 45047 ± 1841 | 137 ± 6 | 56225 ± 2116 | 172 ± 6 | 238 |
| Восточная Сибирь | 528 | 45319 ± 1605 | 86 ± 3 | 56358 ± 1869 | 107 ± 4 | 72905 ± 2175 | 138 ± 4 | 273 |
| Дальний Восток | 331 | 27027 ± 1245 | 82 ± 4 | 38516 ± 1662 | 116 ± 5 | 52543 ± 2148 | 159 ± 6 | 219 |
| **Всего** | **1367** | **128399 ± 19660** | 94 ± 14 | **166524 ± 24517** | 124 ± 18 | **215843 ± 31057** | 162 ± 23 | 1405 |

Примечание. Оценки представлены средними значениями ± SE (стандартной ошибкой).

почти полное, 128 Гт С против старых оценок в 127 Гт С, для слоя 0–50 см – 167 против 174, и для слоя 0–100 см – 216 против старых 241 Гт С.

Очевидно, что причина различий – результат взвешивания почвенных данных по представленности биотопов в соответствующих лесных районах, тогда как в работе, с результатами которой ведется сравнение, вычислялись лишь простые средние данных почвенных разрезов по географическим полосам.

При сравнении средних запасов некоторых биотопов Сибирского региона по глубине 0–50 см с данными, которые относятся к почвам лесных экосистем Енисейского меридиана (Ваганов и др., 2005), можно отметить, что в среднем данные группы сибирских исследователей и наши данные близки по величине. Так, для лесотундры приводятся данные 103 т га$^{-1}$, наши – для редин в Восточно-Сибирский и Западно-Сибирский районах притундровых лесов и редкостойной тайги – 100 и 67 т га$^{-1}$ соответственно. Для северной тайги– 118 т га$^{-1}$, против наших данных в Восточно-Сибирском таежном мерзлотном районе 120 т га$^{-1}$. Для средней тайги авторы приводят данные по Енисейскому бассейну 107 т га$^{-1}$, наши данные для таежных лесов Западно-Сибирского равнинного таежного района – 108 т га$^{-1}$, Среднесибирского плоскогорного таежного района – 89 т га$^{-1}$. В южной тайге, в районе Енисейского меридиана, приведены данные в 134 т га$^{-1}$, для наших лесных районов в преобладающих биотопах Западно-Сибирского и Среднесибирского подтаежно-лесостепного районов – 143 и 144 т га$^{-1}$ соответственно. Всего по Сибири в цитируемой работе среднее приведено 114 т га$^{-1}$ в слое 0–50 см, у нас эта расчетная величина равна по Сибирскому региону в целом 119 т га$^{-1}$. Таким образом, наблюдается вполне хорошее совпадение величин, особенно для агрегированных территорий.

В работе Черновой и др. (2021) оценены общие запасы углерода в толще 0–30 см для всей территории страны в 101 Гт С. Нам это кажется заниженной оценкой, т. к. только для территории лесных районов, что составляет 80% от всей территории страны, запас углерода в этом слое оценен нами в 128.4 Гт С. В предыдущей работе автора, Черновой и др. (2020), отмечено, что для разных ландшафтов недооценка запасов органического углерода почв варьирует от 10 до 40%. В этой же работе приводятся данные по полугидроморфным почвам Карелии, запасы углерода в них в среднем составляют 73 ± 8.2 т га$^{-1}$, что в 7 раз выше, чем в автоморфных почвах. Наши данные этого региона равны 92 ± 29 т га$^{-1}$. Авторы подчеркивают, что пренебрежение вкладом полугидроморфных почв в общий запас органического углерода почв региона приводит к заниженным оценкам.

В работе Щепащенко и др. (2013) оценены запасы органического углерода в почвах России. Согласно полученным авторами оценкам, общие запасы органического углерода в однометровом слое почвы на территории Российской Федерации составляют 317.1 Пг (или в среднем для территории страны – 19.2 кг С/м$^2$). Можно сказать, что в целом по России они оценивают углерод в 317 Гт С против наших 216 Гт С, а средние запасы в 192 т С га$^{-1}$ против наших – 162 ± 23 т С га$^{-1}$. Различия могут быть связаны с размером территории, но в работе не приводятся данные, на какую площадь были проведены расчеты.

В работе Швиденко, Щепащенко (2014) приводятся запасы органического углерода почвы лесных экосистем в региональном и суммарном разрезе, т.е. для Европейской и Азиатской части страны и в целом для всей России. Расчеты приведены для метрового слоя. Можно видеть, что суммарные значения наших расчетов, наоборот, несколько выше – по Европейской части наши – 34 Гт С против 27 Гт С, для Азиатской части – наши 182 против 117 Гт С, и в целом для России – наши 216 против 145 Гт С. Объяснение расхождений можно найти в площадных оценках, т. к. если для Европейской части России площади существенно не расходятся – 168 млн га у авторов против наших 181 млн. га, то оценки для Азиатской части расходятся значительно – авторы приводят цифры в 653 млн га, тогда как только Сибирский регион у нас оценивается в 855 млн га, а еще и площадь региона Дальнего Востока у нас оценена в 331 млн га. Возможно, что авторы считают только покрытые лесом территории, а земли, не покрытые лесом и нелесные, которые также относятся к лесному фонду, в расчет не входят. И в целом по России авторы приводят суммарную цифру в 821 млн га, наша оценка для 1367 млн га, что и объясняет столь существенное расхождение суммарных запасов органического углерода почв.

В материалах Глобального симпозиума по органическому углероду почвы (FAO, 2017) мировые запасы углерода почв оценены в 1417 Гт С, таким образом, наши расчеты для лесных почв России показывают, что эта величина составляет **не менее 15% от мировых запасов** почвенного углерода.

Отметим, что близкое соответствие полученных нами данных и результатов оценок запасов углерода почв, полученных другими авторами, может быть лишь для регионов с невысоким биотопическим разнообразием. В этом случае взвешенные по площадям биотопов оценки не должны слишком расходиться с невзвешенными оценками. В прочих случаях можно ожидать наличие существенных различий в оценках запасов углерода почв, полученных разными методами интерполя-

ции данных. Очевидно, что сбор новых почвенных данных и получение репрезентативных по разнообразию категорий земель (биотопов) выборок должен сократить разрыв оценок, полученных разными методами интерполяции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход интерполяции почвенных данных на площадь, в котором в качестве пространственных субъектов выступают такие экологически обоснованные сущности, как лесные районы. Суть подхода заключается в процессе взвешивания почвенных данных по площадям биотопов, составляющих лесные районы при получения средних по лесным районам оценок. Такой подход основан на статистически обоснованном допущении о связи лесных районов и биотопов, а также взаимодействии этих факторов с содержанием углерода почв.

Оценки углерода почв, полученных предложенным подходом, могут служить основой для экосистемных исследований бюджета углерода в пределах эколого-административного деления РФ на лесные районы.

Побочным продуктом проделанной работы оказалось выявление мест (сочетаний лесных районов и биопопов), в которых необходимо проведение почвенных исследований. Это белые пятна в базе почвенных данных, заполнение которых существенно увеличит точность региональных (и глобальных) оценок содержания углерода почв России. Отметим, что предложенная работа в отличие от оценок предшественников (Щепащенко и др., 2013) основана на максимальном объеме имеющихся на данный момент эмпирических данных (собственно, почвенных разрезов) и минимуме допущений. Появление новых почвенных данных позволит вносить коррекции оценок и производить все более точные интерполяции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алексеев В.А., Бердси Р.А.* Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева, 1994. 173 с.

*Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В. и др.* Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода. // Сибирский экологический журн. 2005. Т. 12. № 4. С. 631–649.

*Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В.* Запасы и содержание соединений углерода в болотных экосистемах России // Почвоведение. 1997. № 12. С. 1470–1477.

*Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.* Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

*Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И. и др.* Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 200 с.

*Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.

*Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.

*Пастухов А.В., Каверин Д.А.* Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094.

*Рожков В.А., Вагнер В.В., Когут Б.М. и др.* Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева, XV. М.: Наука, 1997. С. 5–58.

*Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Пространственная вариабельность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.

*Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П., Шибарева С.В.* Базы данных “Органический углерод” и “Запасы растительного вещества в экосистемах Сибири” как средство оценки углеродного баланса, его моделирования и прогнозирования на геоинформационной основе // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. Спецвыпуск № 2. С. 131–139.

*Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.* Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.

*Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепащенко Д.Г.* Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286.

*Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.

*Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.

*Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В.* Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.

*Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.

*Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* Запасы органического углерода в почвах лесов России // Природные и антропогенные экосистемы: проблемы и решения. М.: БИБЛИО-ГЛОБУС, 2017. С. 19–60. ISBN 978-5-6040237-3-0

*Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* БД “Почвенные характеристики Северной Евразии”. Свидетельство о гос. регистрации БД в Федеральной службе интеллектуальной собственности № 2018621164 от 17.05.2018 г.

*Щепащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.

*Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г.* Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.

Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Rome, Italy. 534 p.

*Shvidenko A., Nilsson S.* A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // Tellus. 2003. V. 55. № 2. P. 391–415.

*Sothe C., Gonsamo A., Arabian J., Kurz W.A., Finkelstein S.A., Snider J.* Large soil carbon storage in terrestrial ecosystems of Canada. *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr* (2021).

*Stolbovoi V.* Carbon in Russian Soils // Climatic Change. 2002. V. 55. № 1–2. P. 131–156.

*Stolbovoi V.* Soil carbon in the forests of Russia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. № 11. P. 203–222.

*Stolbovoi V., McCallum I.* Land Resources of Russia (CD-ROM). IIASA & RAS. Laxenburg, Austria, 2002.

*Vinson T.S., Kolchugina T.P.* Pools and fluxes of biogenic carbon in the Former Soviet Union // Water, Air, and Soil Pollution. 1993. № 70. P. 223–237.

# Estimate of the Soil Carbon Stock of Russia's Forested Regions Using the Soil Properties Databases

**O. V. Chestnykh[1, 2, *], V. I. Grabovskiy[1], and D. G. Zamolodchikov[1, 3]**

[1]*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32 bldg. 14, Moscow, 117234 Russia*

[2]*Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

[3]*Higher School of Economics, Pokrovskiy blvd., 11, Moscow, 109028 Russia*

**E-mail: ochestn@mail.ru*

**Study relevance and objectives.** Soil is one of the key pools of carbon in terrestrial ecosystems. According to recent data, the soil carbon pool of forest ecosystems may be significantly underestimated. In this regard, obtaining data on the forest soils carbon reliably interpolated on geographic areal contours is of particular interest. In this paper, the available data on soil carbon stocks are aggregated by forest regions – officially approved ecological-administrative spatial units. Forest regions served as a topological basis for the sample data extrapolation to the entire territory of the corresponding region and forest lands in general. The immediate task of this work is the interpolation of data from soil profiles by layers of the soil stratum in forest regions. **Study objects and methods.** The basis for calculating the carbon stocks in the forest and tundra soils of Russia was a database that combines information on soil sections gathered from 300 literary sources. To determine the spatial differentiation of the average values, all the sections present in the database were distributed among different forest regions according to their coordinates. For each section, a forest region was determined, and based on the description of a section, a biotope. A total of 1405 soil sections were selected containing all the data necessary for analysis: coordinates, calculated data on the carbon content at various soil levels, and data on the biotope in which the section was made. **Study results.** The regression analysis of the correlation between soils' carbon stocks and biotopes, as well as the forest regions confirmed the adequacy of the selected cartographic basis for interpolation, which confirmed the validity of the choice of the topological basis for soil data interpolation. The total and average reserves of soil carbon were obtained for an area of $1368 \times 10^6$ ha of forest regions of Russia. **Conclusions.** The total $C_{soil}$ stock for the territory of Russia within the layers 0–30 cm, 0–50 cm, and 0–100 cm is estimated at $128.4 \times 10^9$ t C, $166.5 \times 10^9$ and $215.8 \times 10^9$ t C. For the layer 0–100 cm, the average reserves are $162 \pm 23$ t C $ha^{-1}$, with estimates being mean values ±SE (standard error). Maps of the carbon stocks distribution for the forest regions of Russia have been obtained in relation to different depths of the sections.

*Keywords: Russia's forest resources, forest forming species, database, forest soils, stock of soil biological carbon* ($C_{soil}$).

**Acknowledgements:** The study has been carried out within the framework of the State contract with the Moscow State University № 121032500094-5 "Creating conceptual and mathematical models of the terrestrial ecosystems' zonal types" (database analysis) and with the support from RSF № 19-77-30015 (carbon stock estimates).

## REFERENCES

Alekseev V.A., Berdsi R.A., *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii* (Carbon in ecosystems of forests and peatlands of Russia), Krasnoyarsk: Izd-vo IL SO RAN, 1994, 170 p.

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G., Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 325–336.

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 3, pp. 339–348.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., *BD "Pochvennye kharakteristiki Severnoi Evrazii"* (Database "Soil characteristics of Northern Eurasia"), Certificate of state registration of the database in the Federal Service for Intellectual Property, No. 2018621164 of 05.17.2018.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 8, pp. 816–823.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh tundrovykh i lesotundrovykh ekosistem (Reserves of organic carbon in soils of tundra and forest-tundra ecosystems), *Ekologiya*, 1999, No. 6, pp. 426–432.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Obshchie zapasy biologicheskogo ugleroda i azota v pochvakh lesnogo fonda Rossii (Total storages of biogenic carbon and nitrogen in soils of the forest fund of Russia), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 30–42.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh lesov Rossii (Organic carbon stocks in soils of Russian forests), In: *Prirodnye i antropogennye ekosistemy: problemy i resheniya* (Natural and anthropogenic ecosystems: problems and solutions), Moscow: BIBLIO-GLOBUS, 2017, pp. 19–60.

Efremova T.T., Efremov S.P., Melent'eva N.V., The reserves and forms of carbon compounds in bog ecosystems of Russia, *Eurasian soil science*, 1997, Vol. 30, No. 12, pp. 1318–1325.

Kobak K.I., *Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla* (Biotic components of the carbon cycle), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 248 p.

Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiiskoi Federatsii* (Organic matter in soils of the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 254 p.

Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Soil carbon pools in tundra and taiga ecosystems of northeastern Europe, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 9, pp. 958–967.

*Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Rome, Italy, 534 p.

Rozhkov V.A., Vagner V.V., Kogut B.M., Konyushkov D.E., Sheremet B.V., Zapasy organicheskikh i mineral'nykh form ugleroda v pochvakh Rossii (Stocks of organic and mineral forms of carbon in the soils of Russia), *Uglerod v biogeotsenozakh* (Carbon in biogeocenoses), Conf. Proc. in memory of V.N. Sukacheva, XV., Moscow: Nauka, pp. 5–58.

Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., Spatial variability of the organic carbon pool in soils of forest and steppe biogeocenoses, *Eurasian soil science*, 2008, Vol. 41, No. 12, pp. 1260–1267.

Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F., The pool of organic carbon in the soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 2, pp. 107–116.

Shvidenko A., Nilsson S., A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998, *Tellus*, 2003, Vol. 55, No. 2, pp. 391–415.

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzhet lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.

Sothe C., Gonsamo A., Arabian J., Kurz W.A., Finkelstein S.A., & Snider J., Large soil carbon storage in terrestrial ecosystems of Canada, *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr* (2021).

Stolbovoi V., Carbon in Russian Soils, *Climatic Change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, pp. 131–156.

Stolbovoi V., McCallum I., *Land Resources of Russia* (CD-ROM). IIASA & RAS. Laxenburg, Austria, 2002.

Stolbovoi V., Soil carbon in the forests of Russia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, No. 11, pp. 203–222.

Titlyanova A.A., Kudryashova S.Y., Kosykh N.P., Shibareva S.V., Bazy dannykh "Organicheskii uglerod" i "Zapasy rastitel'nogo veshchestva v ekosistemakh Sibiri" kak sredstvo otsenki uglerodnogo balansa, ego modelirovaniya i prognozirovaniya na geoinformatsionnoi osnove (Databases "Organic carbon" and "Reserves of plant matter in the ecosystems of Siberia" as a means of assessing the carbon balance, its modeling and forecasting on a geoinformation basis), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, Vol. 12, No. 2S, pp. 131–139.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Korovin G.N., Zukert N.V., Lesa Rossii kak rezervuar organicheskogo ugleroda biosfery (Forests of Russia as a reservoir-storage of carbon in the biosphere), Lesovedenie, 2001, No. 5, pp. 8–23.

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B., Lesa i bolota Sibiri v global'nom tsikle ugleroda (Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 4, pp. 631–649.

Vinson T.S., Kolchugina T.P., Pools and fluxes of biogenic carbon in the Former Soviet Union, *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, No. 70, pp. 223–237.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N., A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 706–715.

Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Utkin A.I., Chestnykh O.V., Sohngen B., *Uglerod v lesnom fonde i sel'skokhozyaistvennykh ugod'yakh Rossii* (Carbon pool of the forest fund and the farm lands of Russia), Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK, 2005, 200 p.