

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 911+631.1+550.4

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА
В ПОЧВАХ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ТУНДРЫ И ЛЕСОТУНДРЫ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТА И РЕЛЬЕФА

© 2018 г. П. А. Шарый^{1,*}, Л. С. Шарая², А. В. Пастухов³, Д. А. Каверин³

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

² Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия

³ Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*e-mail: p_shary@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2016 г.

Принята в печать 27.07.2018 г.

Оценка запасов почвенного органического углерода (ПОУ) на участке 11 800 км² тундры и лесотундры в бассейне р. Усы проведена с помощью множественной регрессии, учитывающей как роль таксонов почв, так и влияние климата и рельефа. Модель объясняла 84% пространственной изменчивости запасов ПОУ. Найдены отрицательные связи запасов ПОУ с климатическими нормами осадков июня, а также с высотой, обсуждаются причины этих зависимостей. На изученный участок по модели рассчитаны карта запасов ПОУ разрешения 300 м. Рассчитана также карта запасов ПОУ при использовании не меняющихся в пространстве “эталонных” значений – средних по точкам наблюдения для таксонов почв. Среднее значение запасов ПОУ по модели составило 21.6 кгС/м², а по матрице с “эталонами” – 32.0 кгС/м². Предложены скорректированные рассчитанные из модели “эталонные” значения для таксонов почв данного региона, которые в полтора раза ниже полученных по точкам наблюдения. Показано, что средние отклонения запасов ПОУ от скорректированных “эталонных” значений, отражающие влияние климата и рельефа, составляют 5.85 кгС/м². Осуществленный здесь учет климата и рельефа в дополнение к таксонам почв дает более корректную оценку запасов ПОУ, чем часто используемые “эталонные” значения для таксонов почв. Показано, что эти различия не малы.

Ключевые слова: пространственная изменчивость, регрессионная модель, южная тундра, торфяники

DOI: 10.1134/S2587556618060146

Введение. Оценки суммарных запасов почвенного органического углерода (ПОУ) полярно-арктической зоны России расходятся у разных авторов в 2–3 раза. Например, для Восточно-Европейской ландшафтной провинции, с различием в два раза от 19.2–21.1 Пг [2, 5] до 40.2–43.7 Пг [3, 20] (1 Пг = 1 петаграмм = 10¹⁸ г). Основной причиной этого считают то, что оценки ПОУ рассчитываются путем простой экстраполяции ограниченного числа полевых данных на большие площади без учета почвенной мозаики, геоморфологических различий и других условий окружающей среды [5, 6]. К тому же не всегда доступны и данные о глубине торфяных залежей, которая достигает иногда 7–8 м [8]. Для протяженных местностей тепловой режим и растительность тундры закономерно меняются [30], а с ними вместе и “эталонные” значения запасов ПОУ для данного типа почв [4, 10].

Наблюдаемое относительно быстрое таяние вечной мерзлоты потенциально способно приве-

сти к резкому увеличению поступления CO₂ и CH₄ в атмосферу, из-за чего роль вечной мерзлоты рассматривается как одна из ключевых в глобальном цикле углерода [21]. Оценки площади вечной мерзлоты суши показывают, что средняя доля ее площади в России составляет более 54% от мировой [15]; речь идет об оценке отношения площадей криолитозон, а не какого-либо биома. По этой причине важны более точные оценки запасов ПОУ в зоне вечной мерзлоты России.

Для Восточно-Европейской ландшафтной провинции среднее значение запасов ПОУ в южной тундре (119.2 тыс. км²) было оценено как 14.1 кгС/м², а в лесотундре (63.8 тыс. км²) – как 31.1 кгС/м² [5]. Для южной тундры и лесотундры бассейна р. Усы (93.5 тыс. км²) того же региона получена оценка запасов ПОУ 38.3 кгС/м² с примерно равными оценками для южной тундры и лесотундры [17]. Расхождение между оценками

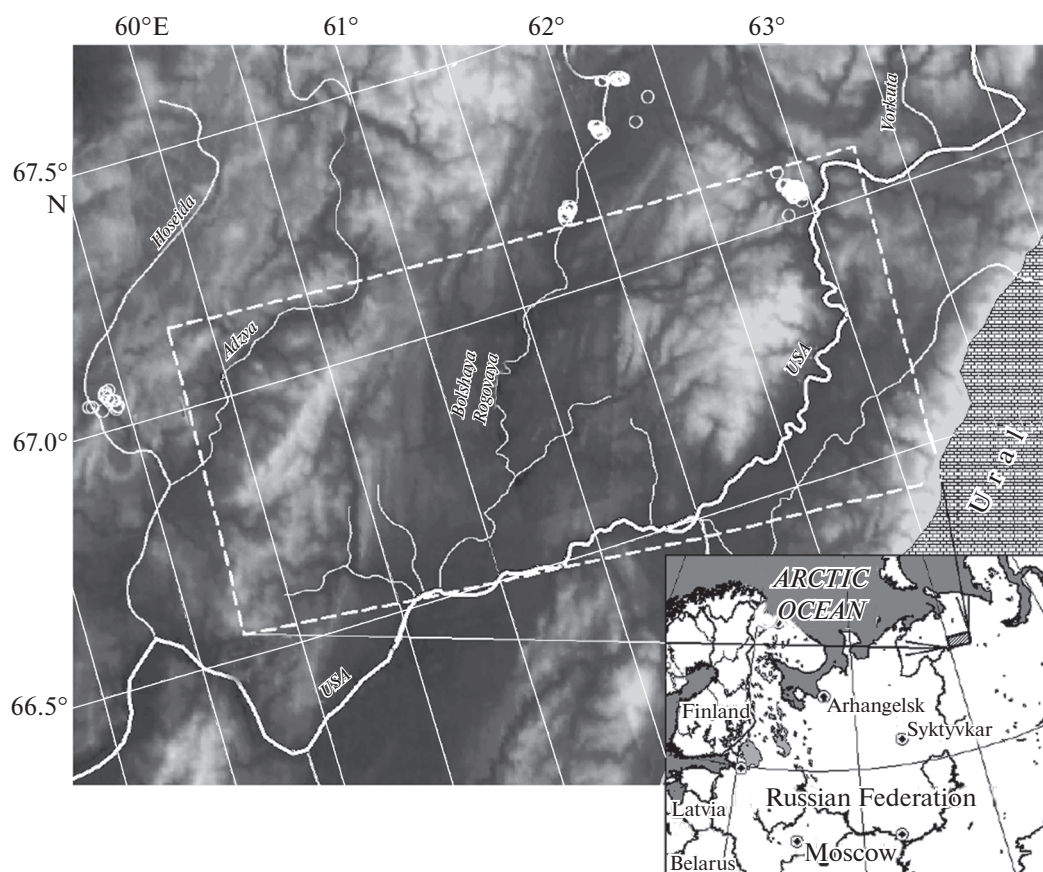


Рис. 1. Карта высот и участок исследования “Уса”. Белые кружки – точки наблюдения, пунктирный прямоугольник – участок “Уса”, светлые оттенки отвечают большим значениям высоты. Диапазон высот участка – от 18 до 323 м.

разных авторов существенно, особенно для южной тундры – в 2.7 раза.

Целью работы является выявление закономерностей пространственного распределения запасов ПОУ в зависимости от мозаики почв, климата и рельефа на протяженном участке Восточно-Европейской провинции (11.8 тыс. км²), нахождение более корректных “эталонных” значений запасов ПОУ, а также сравнение полученных по “эталонным” значениям запасов ПОУ с найденными при учете зависимости этих значений от климата и рельефа.

Объекты и методы. Участок исследования. Участок исследования “Уса” площадью 11 800 км² расположен в многолетнемерзлых породах южной тундры (с юга – лесотундры) северо-востока европейской России (рис. 1).

Этот участок характеризуется избыточным увлажнением и ростом осадков за последние десятилетия [1, 24], а также необычно обильной в Арктике растительностью южной тундры [26]. В отличие от всей Арктики России, за последние десятилетия здесь снижалась фитомасса растительности [14].

Отбор образцов. Образцы почв отбирали с вертикальным разрежением 5–10 см (5 см – в торфе). В свободных от вечной мерзлоты слоях минеральных почв образцы отбирали фиксированного объема пробоотборниками, горизонтально вставлявшимися в стенки почвенных разрезов. В многолетней мерзлоте они отбирались забивавшейся в землю стальной трубой. В торфяниках и озерных отложениях образцы отбирались Русским торфяным буром.

Данные о запасах ПОУ в почвах были собраны со 150 точек наблюдения, для каждой координаты определялись GPS-приемником. Образцы почв отбирались из слоя 0–1 м для минеральных почв и на всю глубину для торфяников, включая дополнительные 30 см минеральных почв ниже торфа, поскольку под торфом запасы ПОУ увеличены [18]. Эти запасы ПОУ характеризуются как полные [18], так как концентрация органического углерода в минеральных почвах тундры падает с глубиной наиболее быстро среди всех биомов мира, так что запасы ПОУ в слое 1–3 м минеральных почв составляют лишь 27% от запасов ПОУ в верхнем метре [19].

Отбор проб почв проводился в конце июля и в августе 2007 и 2008 г. Из 150 точек в конечную выборку вошли 110, поскольку расстояние между некоторыми точками наблюдения было меньше 300 м; в этих случаях запасы ПОУ агрегировались взятием среднего для каждого элемента матрицы, в который попадало более одной точки наблюдения.

Измерения ПОУ велись в основном на пяти участках площадью 9–18 км² каждый, причем внутри каждого точки наблюдения были рандомизованы; четыре из них описаны в работе [18].

Оценка запасов ПОУ. Точное измерение запасов ПОУ предполагает корректный пересчет измеренной концентрации органического вещества почвы в концентрацию углерода, а также измерение объемной плотности d воздушно-сухой почвы и толщины образца h . Концентрация C может быть измерена анализатором элементов, и тогда пересчет не нужен, но такие измерения занимают много времени. Кроме того, для некоторых образцов известны не все нужные для определения запасов ПОУ свойства. Поэтому нужно уменьшать число измеряемых величин, вычисляя остальные.

При определении запаса ПОУ нужны три величины: концентрация органического углерода C (вес. %), плотность воздушно-сухой почвы d (г/см³) и толщина образца почвы h (см). Тогда для данного образца

$$\text{ПОУ} = 0.1 \cdot d \cdot C \cdot h, \quad (1)$$

где благодаря множителю 0.1 запас ПОУ в образце выражен в кгС/м², а искомый запас ПОУ в данной точке наблюдения есть сумма запасов ПОУ по всем образцам из данного слоя почвы.

Для минеральных почв проводилось измерение плотности d путем сушки при 95°C в течение 24 часов. Потеря на прокалывание LOI (loss on ignition) в вес. % при 550°C (6 ч) использовалась для определения концентрации C в органических соединениях, при 950°C (2 ч) – концентрации C в карбонатах. Концентрации C (вес. %) определяли на анализаторе элементов (CE-instruments, EA 110) для некоторого подмножества образцов. По этим измерениям построена [18] регрессионная модель для C (%) в зависимости от LOI,

$$C = 0.362 \cdot \text{LOI} + 0.0059 \cdot \text{LOI}^2 - 0.00005 \cdot \text{LOI}^3 (n = 171, R^2 = 0.98), \quad (2)$$

по которой рассчитывали концентрацию C тех образцов почв, для которых измерены LOI, но не C . Связь здесь тесная, и модель позволяла измерять d , LOI и h , а C находить расчетом.

Для образцов минеральных почв с потерянными хорошими значениями плотности d (чаще из-за проблем с оценкой объема образца в поле) d

оценивалась на основе C регрессионной моделью для образцов почв, в которых были доступны как C (%), так и d (г/см³) [18]

$$d = 1.2559 \cdot C^{-0.6831} (n = 831, R^2 = 0.73). \quad (3)$$

Показано [8], что, помимо концентрации C , плотность d зависит еще от глубины залегания горизонта почвы, причем учет того и другого в регрессии заметно увеличивал R^2 (до 0.83). Поэтому эта формула могла давать некоторые ошибки, однако, таких образцов было сравнительно немного.

Для торфяников (Histosols), где не были доступны образцы подторфовой минеральной почвы, добавка рассчитывалась по данным от 21 точки, согласно которым $d = 0.99 \pm 0.48$ г/см³ и $C = 3.42 \pm 3.19\%$ для $h = 30$ см [18]. Отсюда, минеральная почва под торфом сильно обогащена ПОУ: расчет по формуле (1) дает для этих d , C и $h = 30$ см значение 10.2 кгС/м². Для сравнения, средний запас ПОУ в верхнем метре минеральных почв тундры мира оценен как 14.2 кгС/м² [19] и как 14.0 кгС/м² для минеральных почв тундры России [10]. Для минеральных почв в запасы ПОУ входил также оценивавшийся в подстилке запас углерода.

Получение матрицы характеристик почв. Все матрицы данных о почвах, климате и рельефе использовались в единой проекции (Каврайского для европейской части России); разрешение всех матриц 300 м.

Карта трех таксонов почв: 1 – органических (торфяников), 2 – минеральных маломощных автоморфных (мощность органогенного горизонта до 10 см), 3 – минеральных гидроморфных (мощность от 10 до 40 см) была подготовлена с использованием спутниковых изображений Landsat ETM+ (разрешения 15 м) и QuickBird (2.4 м) с помощью метода контролируемой классификации в программе ERDAS IMAGINE 9.0, как описано в [18], с небольшими изменениями [25]. Информация от четырех каналов изображений (красный, синий, зеленый и инфракрасный) плюс данные точек наблюдения достаточна для получения карт классов наземной растительности, но недостаточна для получения карты этих трех таксонов почв. Если торфяники (мощностью до 4.3 м) практически однозначно идентифицируются по классам наземного покрова, то для разделения минеральных почв на автоморфные и гидроморфные одной растительности недостаточно. Поэтому дополнительно привлекались почвенная карта (М 1:1 млн), геокриологическая карта (М 1:2.5 млн), топографические карты, а при неясностях – полевые наблюдения в ~350 точках.

Хотя эти таксоны не являются типами почв (кроме торфяников) и не входят в какую-либо почвенную классификацию, они удобны для це-

Таблица 1. Индикаторы таксонов почв и описательные статистики

| I_1 | I_2 | Таксоны почв | Средние запасы ПОУ, кгС/м ² | Kvar, % |
|-------|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------|---------|
| 1 | 1 | Гидроморфные почвы (0.1–0.4 м) – 43 точки | 20.3 | 66.9 |
| 2 | 1 | Торфяники (до 4.3 м) – 35 точек | 89.0 | 49.1 |
| 1 | 2 | Автоморфные почвы (до 0.1 м) – 32 точки | 12.5 | 30.1 |

Примечание. Kvar – коэффициент вариации.

лей исследования, так как связаны с мощностью гумуса.

Для получения матрицы запасов ПОУ использовались матрицы рельефа GMTED2010 [12] и климата WorldClim [16] разрешения 300 м для северных территорий, преобразованные в целевую проекцию.

Статистические методы могут учитывать не только количественные (числовые) характеристики ландшафта, но и неколичественные (типы почв и т.п.) [9]. Их обычно описывают с помощью индикаторов, принимающих значение 0 и 1 для учета типов почв. Необходимые для учета трех таксонов почв на изучаемом участке индикаторы I_1 и I_2 определялись по схеме табл. 1.

Для оценки статистического распределения использовались графики нормальной вероятности [23]. Для нормального распределения такой график должен быть близок к прямой. Статистическое распределение запасов ПОУ на участке “Уса” в выборке было далеко от нормального, поэтому использовали логарифм запасов ПОУ.

Для приближения распределения некоторых характеристик рельефа к нормальному использовались нелинейные преобразования, описанные в [9]; такие величины помечены ниже верхним индексом “Т” (например, rot^T).

Для проведения расчетов и построения карт использовалась разработанная П.А. Шарым программа “Аналитическая ГИС Эко”, версия 1.08г.

Результаты и их обсуждение. Измеренные запасы ПОУ менялись от 5.8 до 188.7 кгС/м² при среднем 39.9 кгС/м². Уравнение нелинейной множественной регрессии имело следующий вид

$$\ln(\text{ПОУ}) = 0.02626 \cdot I_1 \text{Риюл} - 0.1617 \cdot \text{Риюн} - 0.003690 \cdot I_2 Z + 0.04225 \cdot I_2 \text{rot}^T + 8.487,$$

$$R^2 = 0.840 \quad (n = 110, \text{Degr} = 1.5\%), \quad P < 10^{-6}. \quad (4)$$

Отсюда 84% пространственной изменчивости $\ln(\text{ПОУ})$ объяснялось таксонами почв, климатом

(осадками июня Риюн и июля Риюл) и рельефом (высотой Z и характеризующим расчлененность рельефа ротором rot); все предикторы значимы в модели.

Здесь $Degr$ есть показатель деградации модели при ее верификации [9]; модель считается успешной прошедшей проверку по методу кросс-валидации Аллена [23] при выполнении критерия $Degr < 50\%$ [9]. График нормальной вероятности остатков модели демонстрировал, что требование нормальности распределения остатков модели (4) выполнено.

Главное в уравнении (4) – отрицательная связь ПОУ с осадками июня Риюн, второй предиктор. Первый предиктор $I_1 \text{Риюл}$ со знаком плюс вносит поправку на снижение ПОУ, определяемое для всех почв осадками июня Риюн, поскольку такое снижение для торфяников заметно меньше, чем для других почв. Третий предиктор $I_2 Z$ описывает изменение запасов ПОУ минеральных автоморфных почв с ростом высоты. Для автоморфных почв парная отрицательная корреляция между запасами ПОУ и высотой характеризуется заметным коэффициентом детерминации $R^2 = 0.52$ и при изменении высоты всего на 58 м запасы ПОУ изменяются на 36% от среднего для этого таксона почв. Четвертый предиктор $I_2 \text{rot}^T$ описывает некоторое возрастание запасов ПОУ автоморфных почв в участках местности с заметно расчлененным рельефом.

Чтобы оценить роль таксонов почв более явно, можно исключить их из рассмотрения. Это давало следующее уравнение регрессии:

$$\ln(\text{ПОУ}) = -0.2282 \cdot \text{Риюн} - 0.05354 \cdot \text{TI} - 0.3979 \cdot \text{kmax}^T + 0.1337 \cdot \text{rot}^T + 13.90,$$

$$R^2 = 0.268 \quad (n = 110, \text{Degr} = 24\%), \quad P < 10^{-5}. \quad (5)$$

Эта модель объясняла сравнительно мало, 27% вариативности $\ln(\text{ПОУ})$, хотя и проходила верификацию по критерию $Degr < 50\%$. Модель (5) подтверждает значимую отрицательную связь $\ln(\text{ПОУ})$ с Риюн. Здесь TI есть описывающий влажность почв топографический индекс, kmax – описывающая гребневые формы рельефа максимальная кривизна. Характеристики рельефа и их смысл описаны в [28].

Сравнение уравнений (4) и (5) показывает, что таксоны почв играют важную роль в пространственной изменчивости запасов ПОУ тундры и лесотундры. Однако климат и рельеф играют важную роль в учете отклонений значений запасов ПОУ от не меняющихся в пространстве “эталонных” значений.

Карта таксонов почв показана на рис. 2. Карта запасов ПОУ показана на рис. 3. Сравнение этих

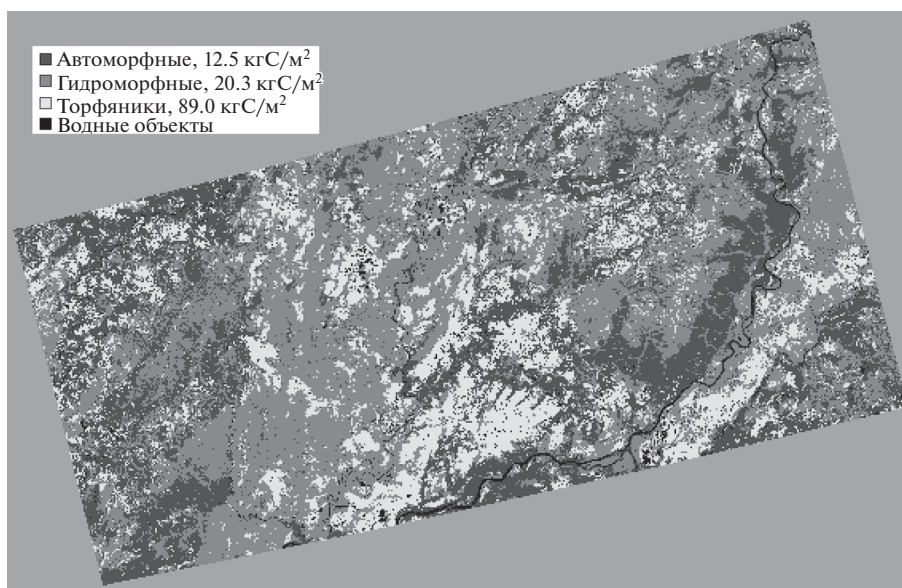


Рис. 2. Карта таксонов почв участка с указанием средних по точкам наблюдения “эталонных” значений запасов ПОУ для каждого таксона почв. Водные объекты (р. Уса и др.) при расчетах исключались из рассмотрения.

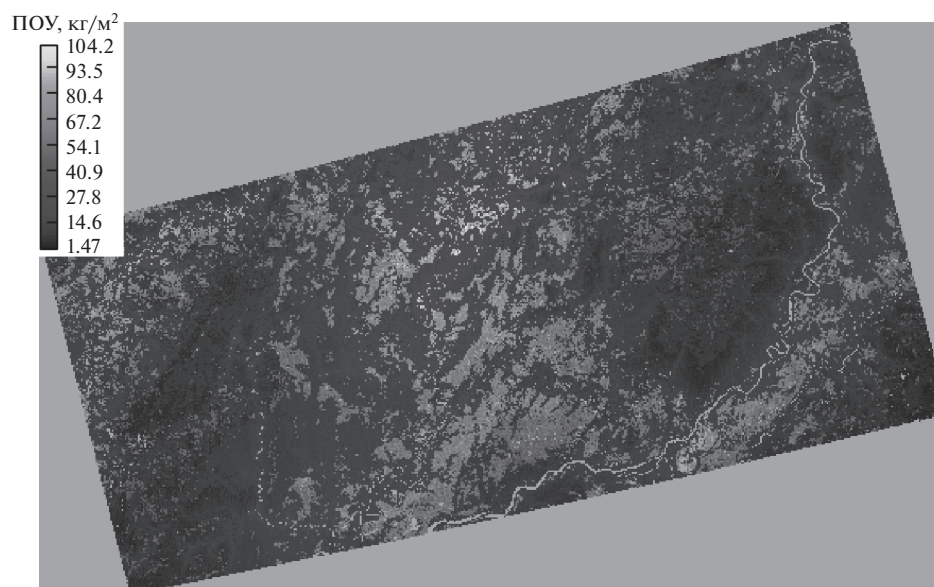


Рис. 3. Предсказательная карта запасов ПОУ, рассчитанная по модели (4).

двух карт показывает, что запасы ПОУ в каждом таксоне почв не постоянны в пространстве, а меняются под влиянием климата и рельефа.

Теперь оценку средних запасов ПОУ можно провести двумя способами. В первом, менее корректном, используются только таксоны почв [5, 10], которым приписывают не меняющиеся в пространстве “эталонные” средние. Используя матрицу таксонов, получаем для участка среднее значение запасов ПОУ 32.0 кгС/м². Во втором способе использовались таксоны почв, климат и

рельеф, то есть модель (4) вместо “эталонов”. Среднее запасы ПОУ при этом есть среднее по карте рассчитанных запасов ПОУ. Эта оценка запасов ПОУ составила 21.6 кгС/м². Таким образом, учет только таксонов почв с помощью “эталонных” для них запасов ПОУ приводил к завышенной оценке, по сравнению с более корректной оценкой, учитывающей изменение ПОУ в почвах под влиянием климата и рельефа. Различие было в полтора раза (на 10.4 кгС/м²).

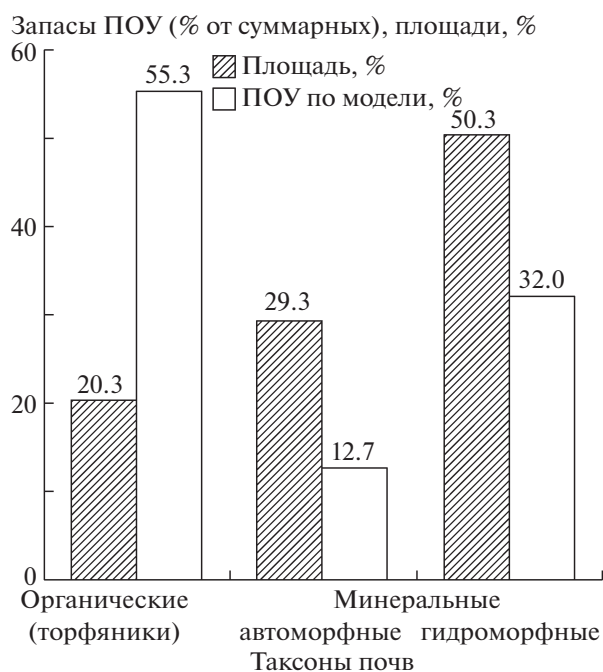


Рис. 4. Гистограмма процентов площади и рассчитанных по модели (4) средних запасов ПОУ для трех таксонов почв.

Среднее по 110 точкам наблюдения запасов ПОУ 39.9 кгС/м^2 было почти в два раза больше, чем среднее по местности 21.6 кгС/м^2 , то есть выбор точек наблюдения на площадках, приуроченных преимущественно к торфяным плато и долинам рек, некорректно характеризовал средние запасы ПОУ на местности.

Из гистограммы рис. 4 видно, что 55% суммарных запасов ПОУ на участке исследования находится в торфяниках, занимающих лишь пятую часть площади местности. Около половины площади занимали минеральные гидроморфные почвы при их вкладе в суммарный запас ПОУ лишь 32%.

Влияние климата и рельефа на запасы ПОУ разных таксонов почв показано с помощью гистограммы рис. 5. Из нее видно, что предсказанные моделью (4) средние значения для разных таксонов почв уменьшены по сравнению со средними запасами ПОУ, рассчитанными по “эталонным” значениям. Уменьшения были в 1.34, 1.48 и 1.51 раза для автоморфных, гидроморфных почв и торфяников соответственно. Мозаика почв, климат и рельеф участков вне точек наблюдения, типичные для местности в целом, отличаются от точек наблюдения.

Представленные в гистограмме (см. рис. 5) рассчитанные по модели средние запасы ПОУ для таксонов почв можно рассматривать как скорректированные “эталонные” запасы ПОУ.

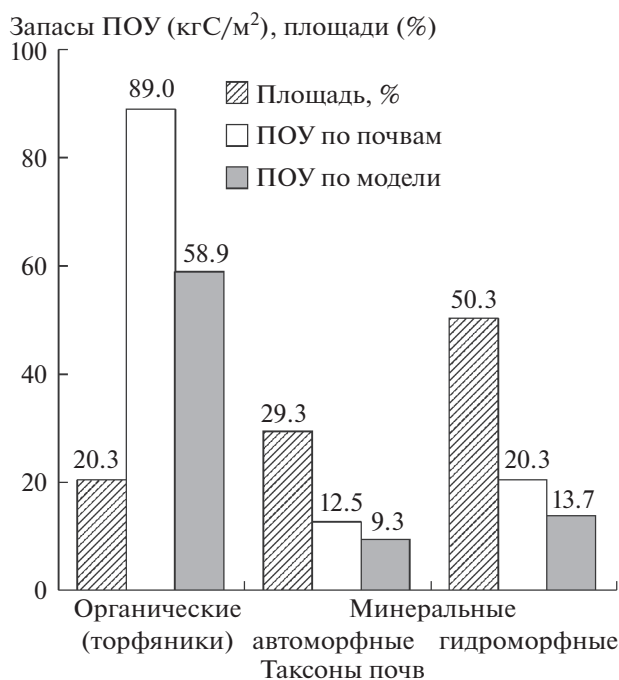


Рис. 5. Гистограмма средних запасов ПОУ и процентов площади трех таксонов почв для оценки запасов ПОУ по “эталонам” для почв и по модели (4).

То есть, умножая их на площади соответствующих таксонов почв ($2228, 3217$ и 5522 км^2 для автоморфных, гидроморфных почв и торфяников соответственно) и складывая, получим суммарный запас ПОУ. Разделив его теперь на общую площадь местности, найдем тот же средний запас ПОУ 21.6 кгС/м^2 , какой дает модель (4). Эти скорректированные “эталонные” отличаются от исходных примерно в полтора раза. Однако для других регионов южной тундры и лесотундры скорректированные “эталонные” могут снова давать неточные оценки запасов ПОУ из-за различия климата и рельефа в них от таковых рассмотренного здесь участка. Ясно, что указать корректные “эталонные” можно только для таксонов почв изученного участка. Тем не менее скорректированные “эталонные” сравнительно мало зависят от специфики выбора точек наблюдения и приближенно пригодны для оценок запасов ПОУ в близких по почвам, климату и рельефу местностях.

Оценим отклонения в рассчитанной по модели (4) карте от скорректированных “эталонных” значений. Для этого вычтем из полученной по модели (4) матрицы матрицу со скорректированными “эталонными” значениями (см. рис. 2). Такая матрица разности обусловлена не мозаикой почв, а климатом и рельефом. На рис. 6 показана гистограмма распределения этих отклонений. Они меняются от -38.6 до 45.3 кгС/м^2 при нулевом среднем значении и стандартном отклонении

5.85 кгС/м². Это стандартное отклонение составляет 27% от среднего запаса ПОУ 21.6 кгС/м².

Сравним полученные здесь результаты с известными в литературе. G. Hugelius и соавт. [18] использовали данные четырех из изученных нами пяти площадок для оценок запасов ПОУ в четырех, много меньших по площади, 9–18 км², участках. Они не использовали климат и рельеф, оценивая запасы ПОУ по крупномасштабным (1 : 25 000) почвенным картам для этих участков, а также по картам растительности. Эти авторы получили средние запасы ПОУ для четырех малых участков, равные 39.5 кгС/м² и 40.5 кгС/м² при использовании почвенных карт и карт классов наземного покрова (растительности) соответственно. Эти значения очень близки к полученному нами среднему по точкам наблюдения 39.9 кгС/м². Их более ранние оценки давали близкие средние 36.0 кгС/м² для лесотундры юга бассейна р. Усы [21] и 38.3 кгС/м² для южной тундры и лесотундры бассейна р. Усы [17]. В этих работах также использовались небольшие участки наблюдения, расположенные близ торфяных плато и долин рек, а интерполяция велась по картам классов растительности вместо более подходящих для этого почвенных карт.

Был неясен вопрос о представительности “эталонов” от таких точек наблюдения для оценки запасов ПОУ всего региона (площадь бассейна р. Усы 93.5 тыс. км²). Наши результаты по участку “Уса” (части бассейна р. Усы площадью 11.8 тыс. км²) показывают, что использовавшиеся этими авторами “эталоны” следует существенно, примерно в полтора раза, уменьшить для получения более реалистичных значений, учитывающих мозаику почвенного покрова местности, а также зависимость запасов ПОУ от климата и рельефа. Это дало бы оценку запасов ПОУ для бассейна р. Усы 25.5 кгС/м², что существенно ближе к нашей оценке 21.6 кгС/м².

О. Честных и соавт. [5] получили оценки среднего запаса ПОУ 14.1 кгС/м² для южной тундры Восточно-Европейской ландшафтной провинции и 31.1 кгС/м² для лесотундры. Принимая, что северная половина участка “Уса” занята южной тундрой, а южная – лесотундрой, находим отсюда оценку запасов ПОУ как среднее этих двух значений, то есть 22.6 кгС/м². Это близко к нашей оценке 21.6 кгС/м². Оценки других авторов [3, 20] почти в 2 раза больше и, надо полагать, примерно в 2 раза завышены для участка “Уса”.

Из характеристик климата в модель (4) вошли лишь летние осадки, т.е. в условиях южной тундры и лесотундры Арктики они важнее температуры для запасов ПОУ.

Объяснение найденной отрицательной связи запасов ПОУ с летними осадками может быть

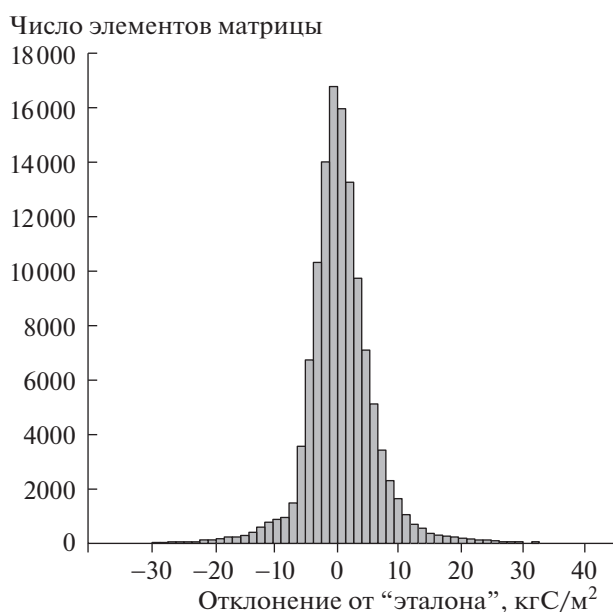


Рис. 6. Гистограмма плотности распределения отклонений предсказанных моделью (4) значений от скорректированных “эталонных” значений.

следующим. Для всей тундры Арктики за 29 лет (1982–2010 гг.) спутниковые измерения вегетационного индекса показали увеличение фитомассы на 19%; для флористической провинции южной тундры “Канин-Печора” (куда входит участок “Уса”), характеризующейся наиболее обильной в Арктике тундровой растительностью [26], за то же время показано *уменьшение* фитомассы на 21% [14]. За последние 50 лет на северо-западе этой избыточно влажной провинции осадки возросли на 20% с 500 до 600 мм/год [1], и почти вдвое за последние десятилетия в ее более континентальной средней части [24], куда входит участок “Уса”. Поэтому можно предположить, что уменьшение фитомассы, а значит и запасов ПОУ, связано с ростом осадков и вымоканием обильной здесь тундровой растительности. Надо заметить, что запасы ПОУ снижаются с возрастанием осадков июня и июля для всех трех изученных таксонов почв, однако, это снижение заметно слабее для торфяников, поэтому первый предиктор I_1 Риюл с положительным знаком является корректирующим, т.е. служит для коррекции значений запасов ПОУ торфяников при снижении их, определяемом вторым предиктором – осадками июня.

Отрицательная связь запасов ПОУ с высотой для минеральных автоморфных почв ($R^2=0.51$) может объясняться падением температуры, с которой связь для этих почв положительна, и то и другое показано в парной корреляции. В условиях избыточного увлажнения это неблагоприятно

для растительности, а потому уменьшение запасов ПОУ с ростом высоты ожидаемо.

Заключение. Применение множественной регрессии, учитывающей таксоны почв, климат и рельеф, позволило описать закономерности изменения запасов ПОУ на протяженном участке южной тундры и лесотундры. Совместно действие этих факторов объясняет 84% пространственной изменчивости запасов ПОУ. Хотя главным фактором среды были почвы, климат и рельеф без учета почв объясняли 27% изменения запасов ПОУ. Поэтому представление о запасах ПОУ как не зависящих или слабо зависящих от климата и рельефа, было бы неверно.

Анализ карты ПОУ позволил ввести скорректированные “эталонные” запасы ПОУ, составляющие 58,9, 9,3 и 13,7 кгС/м² для торфяников и минеральных автоморфных и гидроморфных почв соответственно. Каждое из этих значений примерно в полтора раза ниже средних по точкам наблюдения “эталонных”. Поэтому использование последних приводило к завышенной в полтора-два раза оценке запасов ПОУ.

Высокая мозаичность таксонов почв, сильно отличающихся по запасам ПОУ, является заметным препятствием для объективного выбора точек наблюдения. В результате средние запасы ПОУ в точках (39,9 кгС/м²) почти в два раза превышали средние запасы ПОУ для всей местности (21,6 кгС/м²).

Точная оценка запасов ПОУ для всей Арктики России осложняется недостаточной изученностью почвенного покрова этой территории, особенно для азиатской части России [8], где доступна только почвенная карта масштаба 1:2,5 млн. В этой связи и с учетом того, что средняя доля площади вечной мерзлоты в России составляет более 54% от мировой [15], результаты оценок глобальных запасов ПОУ этой зоны по “эталонным” значениям из бассейна р. Усы, другим доступным “эталонам” и карте М 1:2,5 млн [29] недостаточно корректны и вполне могут быть завышены. E. Davidson и I. Janssens [13] отметили, что современные оценки глобальных запасов ПОУ – лишь начало разговора о будущих точных оценках. Предложенный подход открывает новые возможности для более точных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малкова Г.В. Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 3. С. 3–14.
2. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
3. Рожков В.А., Вагнер В.В., Козут Б.М., Конюшков Д.Е., Шеремет Б.В. Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах. Докл. на XV ежегодных чтениях памяти акад. В.Н. Сукачева. М., 1997. С. 5–58.
4. Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Пространственная вариабельность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.
5. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем России // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.
6. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 2. С. 13–21.
7. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г. Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 816–863.
8. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы органического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Почвоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
9. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1344–1356.
10. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
11. Circumpolar Arctic Vegetation Map. Scale 1:7.500.000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska, 2003.
12. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073, 2011. 26 p.
13. Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature. 2006. V. 440. P. 165–173.
14. Epstein H.E., Yu Q., Reynolds M.K., Walker D.A., Bhatt U.S., Tucker C.J., Pinzon J.E. Climate and grazing influences on dynamics of arctic tundra vegetation and implications for permafrost: Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost, TICOP, Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012) / Salekhard. 2012. V. 4. Extended Abstracts. P. 139–140.
15. Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere. 2012. V. 6. P. 221–233.
16. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. of Climatology. 2005. V. 25. P. 1965–1978.
17. Hugelius G., Kuhry P. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment // Global Biogeochemical Cycles. 2009. V. 23. P. GB3006.

18. *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. of Geophysical Res.* 2011. V. 116. P. G03024.
19. *Jobbágy E.G., Jackson R.B.* The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecol. Applications.* 2000. V. 10. P. 423–436.
20. *Kolchugina T.P., Vinson T.S.* Carbon balance of the continuous permafrost zone of Russia // *Clim. Res.* 1993. V. 3. P. 13–21.
21. *Kuhry P., Mazhitova G.G., Forest P.-A., Deneva S.V., Virtanen T., Kultti S.* Upscaling soil organic carbon estimates for the Usa Basin (Northeast European Russia) using GIS-based landcover and soil classification schemes // *Danish J. of Geography.* 2002. V. 102. P. 11–25.
22. *McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N.* Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecol. Monographs.* 2009. V. 79. P. 523–555.
23. *Montgomery D.C., Peck E.A.* Introduction to Linear Regression Analysis. NY: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
24. *Oberman N.* Contemporary permafrost degradation of Northern European Russia: Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (Fairbanks, Alaska, June 29–July 3, 2008) / Fairbanks, Alaska. 2008. V. 2. P. 1305–1310.
25. *Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Sharaya L.S., Shary P.A.* The spatial distribution of SOC in the forest tundra of the European North-East: Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (TICOP). Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012) / Salekhard. 2012. V. 4. Extended Abstracts. P. 443.
26. *Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A.* NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // *Remote Sensing of Environment.* 2006. V. 102. P. 271–281.
27. *Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H.* Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a synthesis // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2010. V. 21. P. 106–116.
28. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma.* 2002. V. 107. P. 1–32.
29. *Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S.* Soil organic carbon stocks in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles.* 2009. V. 23. P. GB2023.
30. *Walker D.A., Raynolds M.K., Daniëls F.J.A., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W.A., Katenin A.E., Kholod S.S., Markon C.J., Melnikov E.S., Moskalenko N.G., Talbot S.S., Yurtsev B.A., et al.* The circumpolar Arctic vegetation map // *J. of Vegetation Sci.* 2005. V. 16. P. 267–282.

Spatial Distribution of Organic Carbon in Soils of Eastern European Tundra and Forest-Tundra Depending on Climate and Topography

P. A. Shary^{1,*}, L. S. Sharaya², A. V. Pastukhov³, and D. A. Kaverin³

¹ *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia*

² *Institute of Volga Basin Ecology, Russian Academy of Sciences, Togliatti, Russia*

³ *Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia*

*e-mail: p_shary@mail.ru

Received November 03, 2016

Accepted July 27, 2018

Evaluation of soil organic carbon (SOC) storage in 11800 km² area of tundra and forest-tundra in Usa River basin was carried out using multiple regression with account of soil taxa and influence of climate and topography. The model explained 84% of spatial variability in SOC storage. Negative relations were found between SOC and climatic norms of June precipitation, as well as elevation; causes of these relations are discussed. Based on the model, a gridded map of SOC storages was calculated at resolution 300 m. In addition, a grid of SOC storages was calculated using spatially uniform “reference” values that are averages by observation points for soil taxa. An average of SOC storages by the model is 21.6 kgC/m², while it is 32.0 kgC/m² when the “reference” values were used. Corrected “reference” values calculated from the model were suggested that are 1.5 times lower than those obtained from observation points. It was shown that average deviations of SOC storages from corrected “reference” values, which reflect influence of climate and topography, are 5.85 kgC/m². When climate and topography are taken into account in addition to soil taxa, this provides more correct evaluation of SOC than frequently used “reference” values for soil taxa. It is shown that the distinctions are not small.

Keywords: spatial variability, regression model, south tundra, peatlands.

REFERENCES

1. Malkova G.V. Mean-annual ground temperature monitoring on the steady-state station "Bolvensky". *Earth's Cryosphere*, 2010, vol. 14, no. 3, pp. 3–14.
2. Orlov D.S., Biryukova O.N., and Sukhanova N.I. *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiiskoi Federatsii* [Organic Matter of Soils of Russian Federation]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 256 p.
3. Rozhkov V.A., Wagner V.V., Kogut B.M., Konyushkov D.E., and Sheremet B.V. Storage of Organic and Mineral Forms of Carbon in Soils of Russia. In *Uglerod v biogeotsenozakh* [Carbon in Biogeocoenoses]. Moscow, 1997, pp. 5–58. (In Russ.).
4. Ryzhova I.M. and Podvezennaya M.A. Spatial variability of the organic carbon pool in soils of forest and steppe biogeocoenoses. *Euras. Soil Sci.*, 2008, vol. 41, no. 12, pp. 1429–1437.
5. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., and Karelin D.V. Storages of organic carbon in soils of tundra and forest-tundra ecosystems of Russia. *Ekologiya*, 1999, no. 6, pp. 426–432. (In Russ.).
6. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., and Korovin G.N. The distribution of soil organic carbon in soils of forests of Russia. *Lesovedenie*, 1999, no. 2, pp. 13–21. (In Russ.).
7. Chestnykh O.V. and Zamolodchikov D.G. Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content. *Euras. Soil Sci.*, 2004, no. 8, pp. 816–863.
8. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., and Utkin A.I. Total storages of organic carbon and nitrogen in soils of forest reserves of Russia. *Lesovedenie*, 2004, no. 4, pp. 30–42. (In Russ.).
9. Shary P.A. and Pinskiy D.L. Statistical evaluation of the relationships between spatial variability in the organic carbon content in gray forest soils, soil density, concentrations of heavy metals, and topography. *Euras. Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 11, pp. 1344–1356.
10. Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., and Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Euras. Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 2, pp. 123–132.
11. Circumpolar Arctic Vegetation Map. Scale 1:7,500,000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska, 2003.
12. Danielson J.J. and Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). *U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073*, 2011. 26 p.
13. Davidson E.A. and Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, vol. 440, pp. 165–173.
14. Epstein H.E., Yu Q., Reynolds M.K., Walker D.A., Bhatt U.S., Tucker C.J., and Pinzon J.E. Climate and grazing influences on dynamics of arctic tundra vegetation and implications for permafrost. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost, TICOP, Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World*. Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, June 25–29, 2012. Extended Abstracts, vol. 4, pp. 139–140.
15. Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 2012, vol. 6, pp. 221–233.
16. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., and Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2005, vol. 25, pp. 1965–1978.
17. Hugelius G. and Kuhry P. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23, pp. GB3006.
18. Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin F., Marchenko S., Romanovsky V., and 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, vol. 116, pp. G03024.
19. Jobbágy E.G. and Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, vol. 10, pp. 423–436.
20. Kolchugina T.P., Vinson T.S. Carbon balance of the continuous permafrost zone of Russia. *Climatic Res.*, 1993, vol. 3, pp. 13–21.
21. Kuhry P., Mazhitova G.G., Forest P.-A., Deneva S.V., Virtanen T., and Kultti S. Upscaling soil organic carbon estimates for the Usa Basin (Northeast European Russia) using GIS-based landcover and soil classification schemes. *Danish J. Geogr.*, 2002, vol. 102, pp. 11–25.
22. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., and Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs*, 2009, vol. 79, pp. 523–555.
23. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
24. Oberman N. Contemporary permafrost degradation of Northern European Russia. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, June 29–July 3, Fairbanks, Alaska, 2008, vol. 2, pp. 1305–1310.
25. Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Sharaya L.S., and Shary P.A. The spatial distribution of SOC in the forest tundra of the European North-East. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (TICOP). Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Conference held in Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia*, June 25–29, 2012, vol. 4, Extended Abstracts, 443 p.
26. Reynolds M.K., Walker D.A., and Maier H.A. NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic. *Remote Sensing of Environment*, 2006, vol. 102, pp. 271–281.
27. Romanovsky V.E., Smith S.L., and Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, vol. 21, pp. 106–116.
28. Shary P.A., Sharaya L.S., and Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107, pp. 1–32.
29. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., and Zimov S. Soil organic carbon stocks in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23, pp. GB2023.
30. Walker D.A., Reynolds M.K., Daniëls F.J.A., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W.A., Katenin A.E., Kholod S.S., Markon C.J., Melnikov E.S., Moskalenko N.G., Talbot S.S., Yurtsev B.A., et al. The circumpolar Arctic vegetation map. *J. Vegetation Sci.*, 2005, vol. 16, pp. 267–282.