

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА СЕВЕРЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

А.В. Пастухов

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; alpast@mail.ru*

Проведена точная оценка пространственной неоднородности запасов углерода органических соединений в мерзлотных почвах на Европейском Северо-Востоке. Для расчетов использовались средние (эталонные) значения запасов углерода для каждой из почвенных таксономических единиц, а также пространственно привязанные факторы. Получена высокая корреляция между запасами углерода и факторами окружающей среды (объединенные таксоны почв, топография мезорельефа, климатические характеристики). Это позволяет утверждать, что запасы углерода напрямую зависят от этих факторов. Наряду с таксонами почв наиболее значимыми в регионе являются абсолютная высота и сумма осадков июня и июля, менее значима характеристика расчлененности рельефа. При расчете по эталонным значениям средние запасы углерода в почвах составляют $32.0 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$, при учете дополнительно климата и рельефа среднее значение оценивается в $21.6 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$. По данной модели построена карта запасов углерода для исследуемого региона.

Углерод органических соединений, пространственное эмпирико-статистическое моделирование, картография, мерзлотные почвы, рельеф, климат

METHODOLOGY FOR SPATIAL MODELING OF SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN THE NORTH OF EUROPEAN RUSSIA

A.V. Pastukhov

*Institute of Biology, Komi Science Centre UB RAS,
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28, Russia; alpast@mail.ru*

The paper provides accurate assessment of the spatial inhomogeneity of soil organic carbon (SOC) stocks in the permafrost-affected soils of the European Northeast, using reference values (mean standards based on samples) of soil organic carbon stocks for each of the soil taxa and other georeferenced factors. A very high correlation was obtained between soil organic carbon stocks and environmental factors (combined soil taxa, mesotopography, climatic characteristics), which affirms that SOC stocks tend to be directly controlled by them. It is demonstrated that, in conjunction with soil taxa, the absolute height, and the amount of precipitation in June and July are the most significant factors for SOC stocks, whereas the terrain dissection appears a less significant characteristic. When calculated using reference values, the amount of SOC stocks averaged $32.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ for the region, while with accounting for such additional factors as climate and topography, the averaged SOC stocks were estimated at $21.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. This model served as a basis for compilation of the SOC stock map at a regional scale.

Soil organic carbon, spatial empirical-statistical modeling, mapping, permafrost soils, topography, climate

ВВЕДЕНИЕ

Углерод органических соединений ($C_{\text{общ}}$) является одним из важных составляющих почвы, так как оказывает влияние на рост растений, выступая источником энергии и улучшая структуру почвы.

Потенциальные последствия изменения климата для продуктивности сельского хозяйства и увеличения эмиссии парниковых газов в атмосферу привели к резкому повышению интереса к изучению $C_{\text{общ}}$: количественного подсчета его запасов, определения устойчивости и степени уязвимости к температурным изменениям и пр.

[*Jobbagy, Jackson, 2000; Lal, 2004; Houghton, 2007; Schuur et al., 2009*].

Особую озабоченность вызывают оценки запасов $C_{\text{общ}}$ в Арктике и Субарктике, так как его большая часть законсервирована в многолетней мерзлоте. По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата [*IPCC, 2007*], в XXI в. температура в высоких широтах значительно возрастет, поэтому, в отличие от умеренных и тропических широт, арктические и особенно субарктические экосистемы окажутся наиболее уязвимыми компонентами глобального

углеродного цикла [Schuur et al., 2008; McGuire et al., 2009]. Несмотря на значительную разницу и неопределенность в подсчетах, большинство ученых оценивают запасы $C_{\text{общ}}$ заключенного в многолетнемерзлом состоянии, в 2 раза выше запасов атмосферного углерода [Schuur et al., 2009; Tarnocai et al., 2009]. Необходима более точная оценка пространственной неоднородности запасов $C_{\text{общ}}$ в мерзлотных почвах [Johnson et al., 2011]. Существуют единичные работы с региональными подсчетами пространственной изменчивости $C_{\text{общ}}$ во всей толще почвенного профиля (горизонтах O–B–C), деятельном (сезонноталом) слое и многолетнемерзлых горизонтах [Пастухов, Каверин, 2013; Hugelius et al., 2011]. В этих работах были получены средние (эталонные) значения для каждого из почвенных типов, а затем на основе построенных крупномасштабных почвенных карт рассчитаны запасы $C_{\text{общ}}$ на отдельных участках тундры и лесотундры. Почвенные профили для определения эталонных значений $C_{\text{общ}}$ были заложены трансектами, но с учетом изменения типов растительности и геоморфологического положения. Тем не менее оценки $C_{\text{общ}}$ (если применять их для региона в целом) достаточно грубы, так как почвенный покров крайне неоднороден и его пестрота и сложность возрастают при увеличении пространственного разрешения. Поэтому для повышения точности оценки $C_{\text{общ}}$ необходимо использовать пространственно привязанные факторы (физико-химические свойства почвы, климат, микроорганизмы, рельеф, материнские породы, возраст почвы и пространственные координаты). Некоторые исследования с использованием ряда указанных факторов показали, что такой подход приводит к более точному представлению пространственной изменчивости свойств почв и уменьшению прогнозной ошибки [Thompson, Kolka, 2005; Rasmussen, 2006; Meersmans et al., 2008].

Были проведены также исследования по моделированию динамики и пространственному распределению $C_{\text{общ}}$ с использованием климатических моделей, демонстрирующих постепенную деградацию многолетней мерзлоты и, как следствие, увеличение эмиссии $C_{\text{общ}}$ в виде парниковых газов [Lawrence et al., 2008; Koven et al., 2011; Schaefer et al., 2011]. Однако в этих работах остаются существенные недостатки, поскольку оценки $C_{\text{общ}}$ получены с использованием моделей при достаточно грубой эстраполяции из-за ограниченного количества натурных данных, часто не отражающих реальную пространственную мозаику почвенного покрова. Несмотря на это, подобные модели часто

применяются для прогнозирования баланса $C_{\text{общ}}$, но предсказывают возможные потери многолетнемерзлого $C_{\text{общ}}$ в очень широких диапазонах в зависимости от используемого сценария климатического моделирования и параметров, включенных в модель. Например, для сценария с максимально высоким потеплением (representative concentration pathway – RCP 8,5) прогнозируется эмиссия $C_{\text{общ}}$, находящегося в многолетней мерзлоте, 19–45 Гт к 2040 г., 162–288 Гт к 2100 г. и 381–616 Гт к 2300 г. из 1700 Гт всего углерода, заключенного в криолитозоне Северного полушария [Schuur et al., 2013].

Цель настоящей работы – изучение зависимости содержания запасов $C_{\text{общ}}$ от факторов окружающей среды (почвы, рельеф и климат) на региональном уровне. Основная задача – построить максимально точную генерализованную линейную модель пространственного распределения запасов $C_{\text{общ}}$ на южном пределе Европейской криолитозоны, которая включает: 1) реальные пространственно привязанные полевые данные запасов $C_{\text{общ}}$ в основных почвенных группах; 2) климатические данные (температура воздуха и сумма осадков); 3) геоморфологические данные (количественные характеристики рельефа). Применение такого подхода позволяет значительно увеличить пространственное разрешение (до 300 м в 1 пикселе) и уменьшить прогнозируемую ошибку. В перспективе планируется построить прогнозные модели и карты запасов $C_{\text{общ}}$ для 2050, 2100 и 2199 гг., используя различные климатические сценарии, например E-GISS и HadCM3.¹

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый участок находится на Европейском Северо-Востоке, в пределах 66°42′–67°30′ с.ш. и 59°00′–63°10′ в.д. и занимает площадь 18 132.55 км². Данная территория охватывает среднюю часть бассейна р. Уса (основной приток р. Печора) и выбрана в качестве объекта изучения в связи с тем, что является южной границей криолитозоны и региональным экотонном “тундра – северная тайга”, т. е. наиболее уязвима при климатических и(или) антропогенных изменениях.

Исследуемый регион представляет собой слабо-наклонную к северу оконечность Русской равнины, сложенную докембрийскими, силурийскими, девонскими, пермскими, триасовыми, юрскими, меловыми отложениями, которые перекрыты мощными (в среднем 80–100 м) четвертичными отложениями сложного фациального строения

¹ Для расчета прогноза изменений запасов будут использованы два климатических сценария – умеренный и экстремально высокий. E-GISS – умеренная модель Годдарского института космических исследований, НАСА. HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, версия 3) – экстремально высокая модель Центра Hadley, Великобритания, построенная на базе атмосферно-океанической общей циркуляционной модели (AOGCM). Это одна из основных моделей, использованных в IPCC Third Assessment Report в 2001 г.

[Атлас..., 2010]. В геоморфологическом отношении, кроме тектонических движений, предопределивших основные формы рельефа, принимали участие экзогенные процессы: морская трансгрессия, оледенения четвертичного периода и водная эрозия в межледниковое время.

Почвообразующими породами являются моренные, флювиогляциальные, элювиально-делювиальные, озерно-аллювиальные, аллювиальные, озерно-болотные отложения, последние представлены песчано-глинистыми отложениями и торфяниками.

Климат территории – умеренно континентальный, умеренно холодный. Среднегодовая температура воздуха составляет около $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков варьирует от 600 до 700 мм, две трети из которых приходится на теплый период [Атлас..., 1997].

Восточно-европейский Крайний Север характеризуется широким распространением многолетнемерзлых пород различной мощности (иногда до 50 м). Однако современное потепление климата Арктики и Субарктики существенно меняет геокриологические условия в изучаемом районе. Под руслами крупных водотоков и на водораздельных участках мерзлота местами прорезана сквозными таликами, при этом ее кровля имеет сложную конфигурацию. Наблюдается перемежаемость участков сливающейся и несливающейся мерзлоты, причем преобладают последние [Афанасьев, 1986].

В растительном покрове исследуемого района сочетаются ерниковые тундры, бугристые болота, острова еловых и березовых разреженных лесов. Наибольшее участие во флоре в целом, и особенно в сложных растительных группировках, принимают бореальные и субарктические виды. Слабодренированные пространства заняты болотами, среди которых доминирует крупнобугристый тип.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Исследования почвенных профилей для определения запасов углерода

Большая часть полевых определений и измерений запасов $C_{\text{общ}}$ выполнена в 2007–2008 гг. и впоследствии дополнена результатами работ следующих полевых сезонов. Почвенные исследования включали заложение 153 почвенных разрезов с последующим ручным бурением на глубину до 1.5–2.0 м в талых почвах и на 30–50 см в мерзлотных горизонтах в случае близкого (в пределах 1 м) залегания многолетней мерзлоты. На торфяниках образцы отбирали как с обнажений, вскрытых термокарстовыми озерами бугров, так и ручным бурением скважин глубиной до 1.5–2.5 м. Часть почвенных профилей были заложены трансектами протяженностью 900 м с интервалом 100 м, охватывающими разнообразие типов растительности

и геоморфологические элементы. Почвенные образцы отбирали в мерный цилиндр погоризонтно, а также через каждые 5–10 см для определения объемного веса и последующего подсчета запасов $C_{\text{общ}}$.

Химический анализ образцов почв осуществлен в аккредитованной экоаналитической лаборатории “Экоаналит” Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Валовое содержание $C_{\text{общ}}$ определяли на анализаторе EA-1100, кислоторастворимый органический углерод – по методу Тюрина с фотометрическим окончанием. Лабораторные анализы были выполнены согласно руководству [Procedures for Soil Analyses, 2002].

Запасы $C_{\text{общ}}$ для каждого профиля оценивались путем суммирования запасов углерода в каждом горизонте, от поверхности до материнской породы, по следующей формуле:

$$C_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^n C_j \rho_j D_j (1 - L_j / 100) \div 100,$$

где $C_{\text{общ}}$ – общие запасы углерода в каждом почвенном профиле, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$ – порядковый номер почвенного горизонта; C_j – валовое содержание углерода, %; ρ_j – плотность почвы, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; D_j – мощность каждого горизонта, м; L_j – доля почвенного скелета и льда, %. В многолетнемерзлых породах долю льда определяли по разности массы образца в полевых условиях и после сушки при комнатной температуре.

2. Картографические работы

Основой для создания почвенной карты послужили спутниковые многозональные изображения системы Landsat 7 ETM+ в комбинации каналов 5, 4, 3, географически привязанные топографические и почвенные карты, снимки высокого разрешения отдельных участков QuickBird и почвенные данные. Обработка снимков проводилась в программной среде Erdas Imagine 2014 методом управляемой классификации (supervised classification), анализ почвенных полигонов – на базе ArcGIS 10.2. Окончательная корректировка не обеспеченных опорными почвенными разрезами почвенных полигонов выполнена с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР) SRTM с разрешением 90 м, топографических карт и карт четвертичных отложений. Классификационное определение почв и индексация генетических горизонтов проводились согласно Международной коррелятивной базе почвенных ресурсов [IUSS Working Group WRB, 2014], так как в ней применены более формализованные критерии отнесения почв к тому или иному таксону по сравнению с “Классификацией и диагностикой почв России” 2004 г. и официально признанной российскими почвоведом “Классификацией и диагностикой почв СССР” 1977 г. Было выделено 15 таксономических единиц на уровне подгрупп WRB.

Средние значения $C_{\text{общ}}$ [$\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$] для каждой подгруппы почв подсчитывали как среднее арифметическое значение содержания $C_{\text{общ}}$ в исследованных профилях почв для каждой группы и подгруппы почв, обозначенных на карте.

3. Пространственное моделирование и прогнозная ошибка

Основное внимание уделялось методологии определения и созданию базы данных текущих запасов $C_{\text{общ}}$ для исследуемого региона. Связь между изучаемой характеристикой почв (в нашем случае это запасы $C_{\text{общ}}$) и факторами окружающей среды (количественные параметры климата и рельефа) обычно носит статистический характер, так как невозможно учесть бесконечное число факторов среды. Тем не менее если рассматриваемая характеристика почв хорошо коррелирует с факторами среды, то ее можно предсказать непосредственно по этим факторам. Данное направление широко применяется в последние десятилетия в экологии [Guisan, Zimmermann, 2000], почвоведении [Scull et al., 2003] и сельском хозяйстве [Шарый и др., 2011] и известно как предсказательное моделирование (predictive modeling). При таком моделировании рассчитывается матрица характеристик почв, измеренных в нескольких десятках или сотнях точек наблюдения на основе тесных связей с факторами среды, и по ней строится предсказательная карта. Факторы среды представляются матрицами; одна матрица описывает один фактор среды и может насчитывать сотни тысяч элементов.

На исследуемом участке данные о запасах $C_{\text{общ}}$ были отобраны в 153 географически привязанных точках. Разрешение матриц факторов среды составило 300 м, все матрицы переводились в проекцию Каврайского для европейской части России. Поскольку при этом разрешении некоторые точки наблюдения попадали в один и тот же элемент матрицы (напомним, что часть опорных почвенных разрезов закладывалась трансектами через каждые 100 м), данные агрегировали путем осреднения в каждом элементе матрицы в 110 точках наблюдения (выборка A110). В качестве опорных матриц факторов среды использовались спутниковые данные о рельефе GMTED2010 [Danielson, Gesch, 2011] разрешения в плане 15" (т. е. примерно 464 м на экваторе и 182 м на 67° с.ш. региона). Для описания рельефа применялись 18 базовых геоморфометрических величин [Shary et al., 2002]. Матрицы осадков, а также средних, максимальных и минимальных температур каждого месяца разрешения 30" взяты из [Hijmans et al., 2005], по ним рассчитаны также среднегодовые и средние температуры и суммы осадков для зимы, весны, лета и осени.

Для пространственного моделирования и построения прогнозной матрицы (карты) запасов $C_{\text{общ}}$ наши данные по запасам $C_{\text{общ}}$ в сочетании с цифровой матрицей рельефа GMTED2010, производных от нее геоморфометрических величин [Shary et al., 2002], матрицы средних температур и осадков [Hijmans et al., 2005] были статистически объединены. Расчеты топографических признаков и статистическая обработка данных проводились с использованием программных пакетов "Аналитическая ГИС Эко" и "R2" [Шарый и др., 2011].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современная цифровая почвенная карта представляет собой не просто набор традиционных полигонов, а является по существу пространственной базой данных почвенных свойств, основанных на статистических пробах (профилях) ландшафтов. Полевые описания профилей используются для определения пространственного распространения тех или иных почвенных свойств, которые точно измеряются в лаборатории. Эти данные затем используются для аппроксимации и прогнозирования почвенных свойств на неисследованных территориях. Цифровые почвенные карты заполняют неясности таких прогнозов и, основываясь на непрерывно поступающих данных (например, мониторинг), дают информацию о динамических почвенных процессах [Hartemink et al., 2008]. Таким образом, современные карты – это открытые системы для ввода почвенных данных, например таких, как запасы $C_{\text{общ}}$ в прогнозные модели трансформации ландшафтов как ответ на глобальные климатические и антропогенные изменения [Sanchez et al., 2009].

Построенная цифровая почвенная карта исследуемого района содержит информацию о таксонах почв, их географической привязке и площади (табл. 1). В структуре почвенного покрова 73.4 % всей территории приходится на четыре почвенные подгруппы: Cryic Histosols (торфяные мерзлотные почвы)², Histic Cryosols (торфяно-глееземы мерзлотные), Histic Gleysols (торфяно-глееземы) и Stagnosols (криометаморфические почвы). Cryic Histosols, занимая всего 17.6 % территории, вносят наибольший вклад в запасы $C_{\text{общ}}$, который составляет 45.7 % всех запасов.

Столь существенные различия в запасах $C_{\text{общ}}$ между выделенными почвенными таксонами требуют высокой точности почвенной карты, при построении которой необходимо учитывать особенности автоматизированных методов классификации. Снимки Landsat отражают информацию о поверхности растительного покрова обширных участков. На них крупные ареалы торфяных комплексов фиксируются исключительно по распро-

² Здесь и далее названия даны согласно [Классификация и диагностика почв России, 2004].

Таблица 1. Среднее содержание углерода в исследованных профилях

Почвы	Площадь		Мощность ОГ, см (±SD)	Глубина мерзлоты, см (±SD)	C _{общ}	C _{мерз}	C _{орг}	N
	км ²	%						
Cryic Histosols	3138.54	17.6	173 ± 94	84 ± 24	101.6 ± 42.5	54.5 ± 48.4	92.3 ± 42.7	33
Cryic Fibric Histosols	102.07	0.6	77 ± 34	142 ± 77	28.3 ± 11.9	2.8 ± 5.3	20.3 ± 10.6	5
Fibric Histosols	97.62	0.5	80 ± 14	71 ± 19	40.8 ± 4.3	9.6 ± 12.0	35.7 ± 5.6	7
Cryosols	1389.97	7.8	9 ± 5	89 ± 21	11.4 ± 2.4	1.7 ± 1.7	2.9 ± 1.4	14
Histic Cryosols	4687.74	26.5	22 ± 10	55 ± 24	24.8 ± 10.6	8.4 ± 8.8	7.7 ± 4.6	25
Fluvisols	21.11	0.1	4 ± 2	–	13.2 ± 1.3	0.0	1.5 ± 0.6	10
Histic Fluvisols	16.56	0.1	6 ± 1	–	20.6 ± 2.7	0.0	2.0 ± 0.6	4
Gleysols	481.96	2.7	14 ± 5	–	8.0 ± 3.2	0.0	3.1 ± 2.4	3
Histic Gleysols	3042.64	17.1	15 ± 8	–	19.0 ± 3.8	0.0	5.9 ± 4.8	9
Podzols	160.94	0.9	10 ± 5	–	7.4 ± 2.2	0.0	3.2 ± 1.1	2
Histic Podzols	1073.51	6.0	11 ± 3	–	12.7 ± 3.6	0.0	2.5 ± 1.5	4
Stagnosols	2161.48	12.2	9 ± 4	–	12.8 ± 3.8	0.0	2.7 ± 1.1	30
Retisols	964.29	5.4	8 ± 3	–	11.5 ± 1.3	0.0	3.0 ± 1.2	3
Histic Retisols	342.89	1.9	17 ± 5	–	16.1 ± 1.2	0.0	9.0 ± 2.2	3
Regosols*	102.25	0.6	0	–	3.6	0.0	0.0	1
Всего	17 783.57	100	86 ± 113	–	39.5	–	–	153
Водная поверхность	348.98							

Примечание. ОГ – органогенный горизонт; SD – стандартное отклонение; C_{общ} – общие запасы углерода; C_{мерз} – запасы углерода; C_{орг} – запасы углерода в органогенных горизонтах; N – количество исследованных профилей.

* В Regosols попадают почвы с отсутствующим поверхностным покровом, в основном это почвы пляжей и т. п. Антропогенные нарушения на данном участке незначительны, поэтому отдельными контурами на карте не выделяются.

странению багульниково-моршечной тундры. Однако на основе космических снимков можно выделить торфяники с различной мощностью торфа, где развиты как торфяные мерзлотные почвы – Cryic Histosols (мощность торфа более 40 см), так и минеральные торфяно-глеевые почвы (Histic Cryosols) с мощностью торфа 10–40 см. Для дифференциации ареалов этих групп почв обычно требуется выполнять дополнительно значительное количество разрезов и прикопок.

При создании карты использовались ЦМР SRTM с разрешением 90 м [The Shuttle Radar..., 2014]. Данный продукт находится в свободном доступе в сети интернет (<http://glcf.umd.edu/>), представляет собой совокупность значений отметок превышений рельефа, приуроченных к узлам достаточно мелкой регулярной сети, и является цифровым выражением высотных характеристик рельефа на топографической карте. Топографические переменные (крутизна склона, экспозиция склона, абсолютная высота) в комбинации со спектральными характеристиками космоснимков были использованы для пространственного моделирования преобладающего растительного покрова, т. е. для выявления границ между классами растительности.

Построенная почвенная карта запасов C_{общ} для данного региона является полноценной цифровой, а не оцифрованной (как, например, существующая электронная версия Государственной

почвенной карты миллионного масштаба). В ней используется сопоставление всех видов пространственной информации посредством ГИС, поэтому на основе существующей карты можно провести экстраполяцию на незакартографированные области. Но такая карта остается статичной, и мы не можем проецировать существующую почвенную карту вперед на некоторое время, рассчитав, например, запасы C_{общ} для всех точек и запуская новый слой C_{общ} посредством предсказательной функции.

Вышесказанное определяет использование методов пространственно-прогнозного моделирования, одним из которых является метод *scorpan-SSPFe* (пространственная функция предсказания почв с пространственно автокоррелированными ошибками – soil spatial prediction function with spatially autocorrelated errors) [McBratney et al., 2003]. Данный метод наиболее часто применяется для предсказательного почвенного картографирования. Он описывается следующей формулой, предложенной Г. Йенни в 1941 г.:

$$Sa = f(s, c, o, r, p, a, n),$$

где Sa – количественная характеристика таксономической единицы почвы; s – почва (другие характеристики почвы); c – климат (локальные климатические характеристики); o – организмы, растительность, фауна, человек; r – рельеф (морфометрические величины); p – материнская по-

Таблица 2. Среднее содержание углерода в почвенных профилях

I ₁	I ₂	Таксоны	Площадь		Мощность ОГ, см	C _{общ}	C _{мерз}	C _{орг}	N
			км ²	%					
2	1	Органогенные	3338.23	18.8	40–430	89.0 ± 43.7	41.7 ± 46.6	75.2 ± 48.0	35
1	1	Торфянисто-минеральные	9163.34	51.5	18 ± 9	20.3 ± 13.6	–	6.4 ± 4.5	43
1	2	Минеральные	5179.75	29.1	8.3 ± 4.4	12.5 ± 3.8	–	2.6 ± 1.2	32
		Regosols	102.25	0.6	0	3.6	–	0	1
		Всего	17 783.57	100	–	–	–	–	111
		Водная поверхность	348.98						

Примечание. I₁, I₂ – индикаторы 1 и 2; SD – стандартное отклонение.

рода, литология; *a* – возраст, время; *n* – пространственное положение. Этот метод базируется на основе знаменитой почвенной формулы, впервые предложенной В.В. Докучаевым в 1886 г. и уточненной С.А. Захаровым в 1927 г. [Флоринский, 2012].

В модели *scorpan* имеется семь факторов, или множеств входных переменных, о каждом из которых в идеале необходимо получить информацию. С ростом факторов (переменных, или предикторов) падает точность модели (цифровой оценки почвенных ресурсов), поэтому для многих моделей используют процедуры отбора предикторов, например, с помощью пошаговой регрессии по критерию максимума так называемого настроенного коэффициента детерминации [Montgomery, Peck, 1982; Guisan, Zimmermann, 2000]. В реальной практике часто четырех-шести предикторов оказывается достаточно, поскольку остальные уже статистически незначимы в модели [Шарый и др., 2011], т. е. статистическая гипотеза об отличии от нуля регрессионных коэффициентов при них отклоняется на 5%-м уровне.

А. МакБратни с соавторами [McBratney et al., 2003] на основе проведенного литературного анализа указывают на ключевые факторы-предикторы, которые наиболее часто используются в исследованиях: *r* – 80 % случаев, *s* – 35 %, *o* – 25 %, *p* – 25 %, *n* – 20 % и *c* – 5 %, в то время как *a*, по-видимому, не использовался как фактор. Один фактор из семи возможных применялся в 40 % исследований, два, три и четыре фактора – в 40 %, почти 10 и 2 % соответственно. Не рассматривалось пять или более факторов. Самой распространенной комбинацией была *r* и *s*. В большинстве работ применялись ЦМР как главный источник

вспомогательных данных, за которым следовали дистанционно зондированные изображения и ранее существовавшие почвенные покрытия.

В настоящей работе использовано четыре фактора: *r*, *s*, *o*, *n* (это только 2 % исследований по состоянию на 2003 г.), в качестве средства анализа применены генерализованные линейные модели (ГЛМ) в виде множественной регрессии типа:

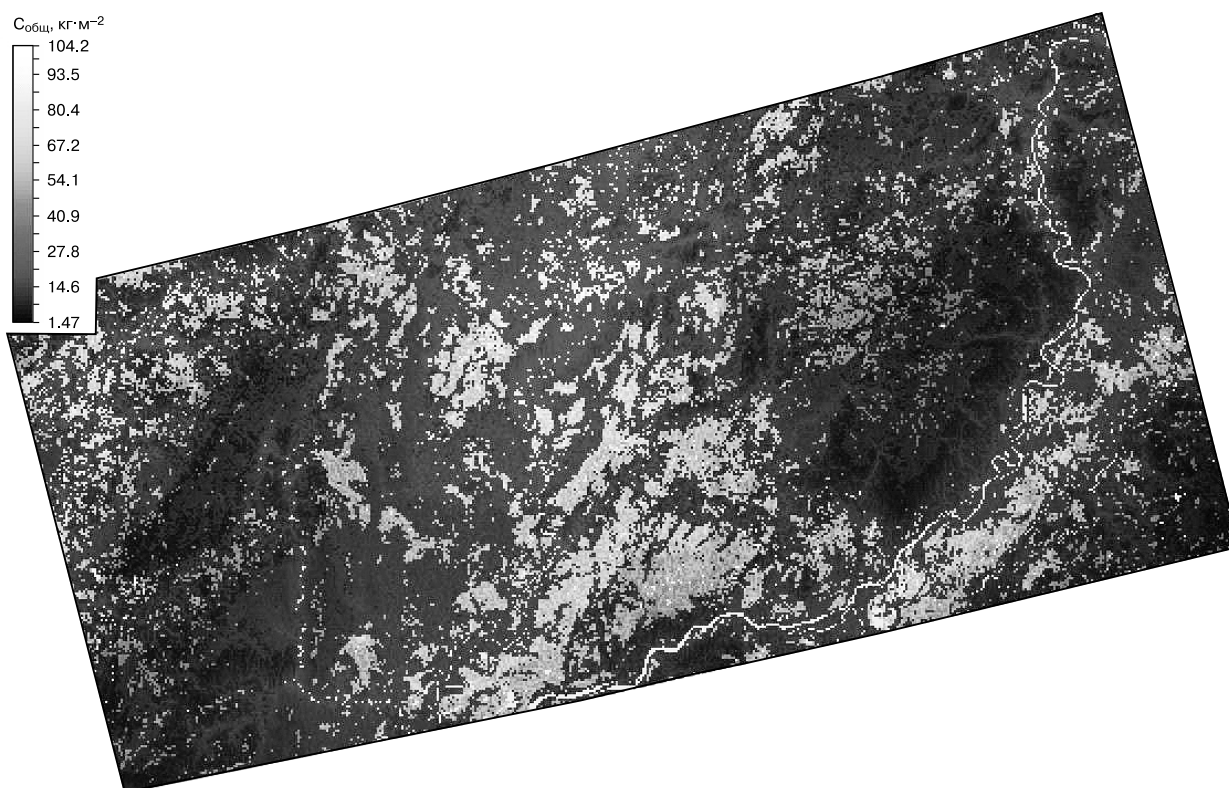
$$f(W) = aA + bB + cC + dD + e + \varepsilon,$$

где *W* – отклик (в нашем случае C_{общ}); *A*, *B*, *C*, *D* – предикторы; *a*, *b*, *c*, *d*, *e* – коэффициенты регрессии; ε – ошибка; *f(W)* – функция связи, корректирующая распределение ошибок, которое должно удовлетворять нормальному закону.

Проверка тесноты связи в ГЛМ и отдельных предикторов в модели, а также оценка независимости предикторов выполнялись по методике, предложенной П.А. Шарым [Шарый и др., 2011]³. В качестве количественных характеристик в модели использовались 18 базовых морфометрических величин [Shary et al., 2002; Shary, 2008] и климатические данные, о чем сказано выше. Неколичественные факторы среды, такие как таксоны почв, описывались с помощью индикаторных переменных, или индикаторов. Индикатор принимает два разных числовых значения, поэтому необходим *N* – 1 индикатор для описания *N* таксонов почв [Montgomery, Peck, 1982]. Если обобщить данные табл. 1, то можно выделить три основных таксона почв, сильно различающихся по запасам C_{общ} (табл. 2). Для описания трех выделенных нами основных таксонов почв необходимо два индикатора (см. табл. 2).

В точках наблюдения выборки A110 (оставшийся объем выборки, использованной в модели,

³ В данном случае рассматриваются запасы C_{общ} на исследуемом участке как отклик, который зависит от факторов окружающей среды – независимых переменных (от почв, характеристик климата, рельефа и пространственного положения). Это позволяет нам поставить вопрос о том, сколько процентов пространственной изменчивости C_{общ} объясняется этими факторами. В то же время такая постановка вопроса дает возможность избежать использования “эталонных” значений C_{общ} для таксонов почв, а также выяснить вопрос, насколько сами “эталонные” значения зависят от климата и рельефа. Для этого используются ГЛМ множественной регрессии, теория которых наиболее развита в настоящее время [Montgomery, Peck, 1982; McCullagh, Nelder, 1989].



Карта запасов углерода для исследуемого региона, рассчитанная по модели (1).

составил 110 точек, так как часть точек была агрегирована, а Regosols и водная поверхность не учитывались) запасы $C_{\text{общ}}$ менялись от 5.8 до 188.7 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$ при среднем $(39.9 \pm 42.6) \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$ и $K_{\text{var}} = 107\%$ (коэффициент вариации)⁴.

Таким образом, была построена пространственная модель запасов $C_{\text{общ}}$ для южной тундры – лесотундры средней части бассейна р. Уса, учитывающая не только таксоны почв, но и характеристики климата и рельефа. Она имеет вид

$$\ln(C_{\text{общ}})_{A110} = 0.026\ 26 \cdot I_1 P_{\text{июл}+16.92} - 0.1617 \cdot P_{\text{июн}-5.29} - 0.003\ 690 \cdot I_2 Z_{-4.17} + 0.042\ 25 \cdot I_2 \text{rot}_{+2.66}^{\text{II}} + 8.487, \quad (1)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0.840$ ($\text{Degr} = 1.5\%$)⁵; значимая вероятность $p < 10^{-6}$.

Здесь A110 – выборка из 110 осредненных точек наблюдения, в которых были определены запасы углерода; 0.026 26, -0.1617 , $-0.003\ 690$, 0.042 25 – коэффициенты регрессии; I_1 , I_2 – предикторы, обозначающие органогенные и минеральные почвы с органогенным горизонтом 0–10 см соответственно (см. табл. 2); нижние индексы $+16.92$, -5.29 , -4.17 , $+2.66$ – значения t -статистик⁶; $P_{\text{июл}}$, $P_{\text{июн}}$ – сумма осадков июля и июня; Z – абсолютная высота; rot^{II} – одна из преобразованных (верхний индекс “II”) морфометрических величин⁷, обозначающих расчлененность рельефа.

Данная модель показывает, что на 84 % пространственное распределение запасов углерода $\ln(C_{\text{общ}})$ зависит от таксонов почв, характеристик климата (осадки $P_{\text{июн}}$ и $P_{\text{июл}}$) и рельефа (высота Z , расчлененность рельефа rot). Все предикторы зна-

⁴ Коэффициент вариации – отношение среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому, выраженный в процентах. Он измеряет относительную меру разброса значений признака в статистической совокупности.

⁵ Показатель деградации $\text{Degr} = 100 \cdot (R^2 / R_{\text{pred}}^2)$ можно использовать для оценки качества предсказаний модели в новых точках наблюдения. Эмпирический критерий $\text{Degr} < 50\%$ применен как критерий успешности верификации по методике Аллена для не слишком больших объемов выборки (< 120) в области экологии, почвоведения и сельского хозяйства, но не в технических дисциплинах, где теснота связи отклика с предикторами может быть значительно больше [Шарый и др., 2011].

⁶ t -статистики зависят от выбранного уровня значимости (везде ниже $p = 0.05$) и числа степеней свободы $n-k-1$, которое везде ниже 105 (n – объем выборки 110, k – число предикторов 4).

⁷ Для статистического анализа морфометрические величины для нормализации их распределения преобразовывались по формулам, приведенным П. Шарым [Shary et al., 2002].

чимы в модели, т. е. главным было различие между торфяниками и другими таксонами почв (индикатор I_1 отличает органогенные почвы от остальных таксонов почв).

Уравнение (1) логарифмировано, так как в нем учтено существенное отклонение статистического распределения $C_{\text{общ}}$ от нормального, которое связано с особой ролью таксонов почв в условиях этого региона. Модель верифицирована методом кросс-валидации Аллена с использованием критерия деградации *Degr*; значение его составляет 1.5 % при допустимом в экологии и почвоведении 50 % [Шарый и др., 2011]. Показано, что наряду с таксонами почв самыми значимыми для запасов $C_{\text{общ}}$ в регионе являются высота и летние осадки, менее значима характеристика расчлененности рельефа. При оценке средних запасов $C_{\text{общ}}$ по эталонным значениям для почв получено $32.0 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$, при учете дополнительно климата и рельефа средние запасы углерода составили $21.6 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$ (см. рисунок). Несмотря на то, что запасы $C_{\text{орг}}$ в органогенных почвах (торфяниках) практически не зависят от климата и рельефа, в минеральных таксонах почв они существенно связаны с климатом и рельефом, что и вызывает уменьшение оценки средних запасов $C_{\text{общ}}$ при учете не только таксонов почв, но также климата и рельефа. Поэтому существующие в настоящее время и предлагаемые в литературе средние запасы $C_{\text{общ}}$ должны быть скорректированы. Необходимо в расчетах не только учитывать средние запасы углерода таксонов почв, но и использовать характеристики климата и рельефа.

ОБСУЖДЕНИЕ

При построении пространственных моделей возникает много принципиально важных вопросов, касающихся их правильности и точности. Насколько реалистичны данные по запасам $C_{\text{общ}}$, полученные в построенной модели? Имеются ли другие факторы почвообразования? Тем не менее данный подход активно используется в мировой науке. Несомненным преимуществом является его относительная дешевизна по сравнению с традиционными способами, при этом доступны большая часть программного обеспечения и необходимые массивы уже отобранных и проанализированных данных.

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к модели, является качество и количество данных реальных почвенных разрезов для калибровки моделей.

В идеале оптимальной возможностью является использование отбора проб по латинскому гиперкубу [McKay et al., 2000], принужденной схеме Монте-Карло отбора проб. Можно проследить по данным и найти положения, которые наиболее сходны таксономически с комбинацией выбранных значений, либо найти положения, которые соответствуют интервалам различных переменных. В любом случае получается набор пространственных координат (положений), в которых можно наблюдать атрибут(ы) почв.

В реальной практике в высоких северных широтах и прочих труднодоступных местностях обычно удается собрать полевые данные (в нашем случае – запасы $C_{\text{общ}}$) лишь с нескольких малых ключевых участков, а оценить нужно, как правило, запасы $C_{\text{общ}}$ на более протяженной местности, на которой эти площадки выглядят пятнами. В этом случае на самих ключевых участках (площадью $10\text{--}15 \text{ км}^2$) климат учесть нельзя⁸, но при использовании набора расположенных в разных местах участков климат уже улавливается в регрессии. Поэтому предложены методики экстраполяции [Lagacherie et al., 2001], определяющие референтную область (ключевой участок) [Favrot, 1989], которая с помощью слоев пространственных данных хорошо экстраполируется на больший регион. Отбор проб в референтной области делается целевым образом или систематически (модель подгоняется и экстраполируется на остальную часть области). В настоящей работе подход с референтными участками и экстраполяцией является необходимостью, при этом большая теснота связи ($R^2 = 0.84$) и низкая деградация модели (*Degr* = 1.5 %) указывают на удовлетворительное качество экстраполяции.

ВЫВОДЫ

Применение современных методов цифровой картографии в почвоведении, таких как *scorpan-SSPF*, позволяет точно рассчитать и смоделировать пространственную неоднородность запасов углерода органических соединений в мерзлотных почвах на Европейском Северо-Востоке.

Полученные результаты исследований могут быть представлены как в виде растровых карт текущих запасов $C_{\text{общ}}$, так и прогнозных карт (возможен пространственно-временной прогноз) с использованием существующих прогнозно-климатических сценариев (E-GISS, HadCM3 и др.).

Высокая корреляция между пространственной изменчивостью запасов $C_{\text{общ}}$ и факторами окружающей среды (объединенные группы почв,

⁸ Напомним, что разрешение климатических матриц, взятых из [Hijmans et al., 2005], составляет $30''$, или 364 м на 67° с.ш. изучаемого региона, по ним рассчитаны также среднегодовые и средние температуры и суммы осадков для зимы, весны, лета и осени. На маленьком участке площадью $10\text{--}15 \text{ км}^2$ климатические характеристики меняются слабо и не оказывают существенного влияния на отклик в модели.

топография мезорельефа, климатические характеристики) ($R^2 = 0.840$, $p < 10^{-6}$) позволяет утверждать, что распределение запасов $C_{\text{общ}}$ напрямую зависит от этих факторов.

Автор выражает особую признательность Л.С. Шарой, П.А. Шарому за помощь в освоении его уникальной авторской методики и ценные советы по написанию статьи, а также благодарит Д.А. Каверина за совместную работу в полевых и аналитических исследованиях и составление почвенной карты бассейна р. Уса.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ Коми НЦ УрО РАН "Пространственно-временные закономерности формирования торфяных почв на европейском северо-востоке России и их трансформации в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия" (Гр. 115020910065).

Литература

- Атлас** почв Республики Коми / Отв. ред. Г.В. Добровольский, А.И. Таскаев, И.В. Забоева. Сыктывкар, Ин-т биологии УрО РАН, 2010, 355 с.
- Атлас** Республики Коми по климату и гидрологии / Под ред. А.А. Братцева, А.П. Братцева. М., Дрофа, 1997, 115 с.
- Афанасьев А.А.** Отчет по объекту: "Производство групповой геологической съемки м-ба 1:50000 на западном склоне Приполярного Урала на территории листов Q-40-83-Г, 84-В, Г; 95-Б, Г; 96 - А (а, б, в), Б (б, г), В; 107-Б; Q-41-73-В, Г; 74-В, Г; 85-А, Б, Г; 86-А, Б, В, Г" (результаты работ Кожимской ГСП за 1981–1986 гг., в 3 т.). Воркута, Полярноурал-геология, 1986.
- Классификация** и диагностика почв России / Авторы и сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Пасгухов А.В., Каверин Д.А.** Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение, 2013, № 9, с. 1084–1094.
- Флоринский И.В.** Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение, 2012, № 4, с. 500–506.
- Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С.** Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агрехимия, 2011, № 2, с. 57–81.
- 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.
- Favrot J.C.** Une stratégie d'inventaire cartographique à grand échelle: la méthode des secteurs de référence // Science du Sol., 1989, vol. 27, p. 351–368.
- Guisan A., Zimmermann N.E.** Predictive habitat distribution models in ecology // Ecolog. Modelling, 2000, vol. 135, No. 2–3, p. 147–186, doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.
- Hartemink A.E., McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L.** (eds). Digital Soil Mapping with Limited Data. New York, Springer, 2008, 448 p.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L. et al.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Intern. J. Climatol., 2005, vol. 25, No. 15, p. 1965–1978, doi: 10.1002/joc.1276.
- Houghton R.A.** Balancing the global carbon budget // Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 2007, vol. 35, p. 313–347, doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140057.
- Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D. et al.** 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, G03024, doi: 10.1029/2010JG001606.
- IPCC:** Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri, A. Reisinger (eds). IPCC, Geneva, Switzerland, 2007, 104 p.
- IUSS Working Group WRB,** 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Res. Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, 191 p.
- Jobbagy E.G., Jackson R.B.** The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // Ecolog. Applications, 2000, vol. 10, No. 2, p. 423–436, doi: 10.2307/2641104.
- Johnson K.D., Harden J., McGuire A.D. et al.** Soil carbon distribution in Alaska in relation to soil-forming factors // Geoderma, 2011, vol. 167, p. 71–84, doi: 10.1016/j.geoderma.2011.10.006.
- Koven C.D., Ringer B., Friedlingstein P. et al.** Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2011, vol. 108, No. 36, p. 14769–14774, doi: 10.1073/pnas.1103910108.
- Lagacherie P., Robbez-Masson J.M., Nguyen-The N., Barthès J.P.** Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance // Geoderma, 2001, vol. 101, No. 3–4, p. 105–118, doi: 10.1016/S0016-7061(00)00101-4.
- Lal R.** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // Science, 2004, vol. 304, No. 5677, p. 1623–1627, doi: 10.1126/science.1097396.
- Lawrence D.M., Slater A.G., Romanovsky V.E., Nicolsky D.J.** Sensitivity of a model projection of near-surface permafrost degradation to soil column depth and representation of soil organic matter // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, iss. F02011, p. 1–14, doi: 10.1029/2007JF000883.
- McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.** On digital soil mapping // Geoderma, 2003, vol. 117, No. 1–2, p. 3–52, doi: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- McCullagh P.** Generalized Linear Models / P. McCullagh, J.A. Nelder. 2nd ed. U.K., London, Chapman and Hall, 1989, 511 p.
- McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R. et al.** Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // Ecolog. Monogr., 2009, vol. 79, No. 4, p. 523–555, doi: 10.1890/08-2025.1.
- McKay M.D., Conover W.J., Beckman R.J.** A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code // Technometrics, 2000, vol. 42, iss. 1, p. 55–61, doi: 10.1080/00401706.2000.10485979.
- Meersmans J., De Ridder F., Canters F. et al.** A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium) // Geoderma, 2008, vol. 143, No. 1–2, p. 1–13, doi: 10.1016/j.geoderma.2007.08.025.

Montgomery D.C. Introduction to Linear Regression Analysis / D.C. Montgomery, E.A. Peck. New York, John Wiley & Sons, 1982, 504 p.

Procedures for Soil Analyses / L.P. van Reeuwijk (ed.). Wageningen, Netherlands, Intern. Soil Refer. and Inform. Centre, 2002, 101 p.

Rasmussen C. Distribution of soil organic and inorganic carbon pools by biome and soil taxa in Arizona // *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 2006, vol. 70, No. 1, p. 256–265, doi: 10.2136/sssaj2005.0118.

Sanchez P.A., Ahamed S., Carré F. et al. Digital soil map of the world // *Science*, 2009, vol. 325, No. 5941, p. 680–681, doi: 10.1126/science.1175084.

Schaefer K., Zhang T., Bruhwiler L., Barrett A.P. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming // *Tellus B*, 2011, vol. 63, p. 165–180, doi: 10.1111/j.1600-0889.2011.00527.x.

Schuur E.A.G., Abbott B.W., Bowden W.B. et al. Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change // *Climatic Change*, 2013, vol. 119, p. 359–374, doi: 10.1007/s10584-013-0730-7.

Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the Global carbon cycle // *BioScience*, 2008, vol. 58 (8), p. 701–714, doi: 10.1641/B580807.

Schuur E.A.G., Vogel J.G., Crummer K.G. et al. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange

from tundra // *Nature*, 2009, vol. 459, p. 556–559, doi: 10.1038/nature08031.

Scully P., Franklin J., Chadwick O.A., McArthur D. Predictive soil mapping: a review // *Progress in Phys. Geography*, 2003, vol. 27, No. 2, p. 171–197, doi: 10.1191/0309133303pp366ra.

Shary P.A. Models of topography // *Advances in Digital Terrain Analysis. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, XIV* / Q. Zhou, B. Lees, G. Tang (eds). Berlin etc., Springer-Verlag, 2008, p. 29–57, doi: 10.1007/978-3-540-77800-4_3.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*, 2002, vol. 107, No. 1–2, p. 1–32, doi: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles*, 2009, vol. 23, GB2023, doi: 10.1029/2008GB003327.

The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 2014. URL: <http://glcf.umd.edu/data/srtm/> (дата обращения: 09.12.2015).

Thompson J.A., Kolka R.K. Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil landscape modeling // *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 2005, vol. 69, p. 1086–1093, doi: 10.2136/sssaj2004.0322.

*Поступила в редакцию
30 апреля 2015 г.*