НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 28–36 http://www.izdatgeo.ru

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 631.4(51-7) DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(28-36)

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ УМЕРЕННОМ КЛИМАТИЧЕСКОМ СЦЕНАРИИ НА СЕВЕРЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

А.В. Пастухов

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

Дана прогнозная оценка изменения региональных запасов почвенного углерода в тундре и лесотундре северо-востока Европейской России. Построены региональные прогнозные матрицы и карты, которые объясняют 83 % изменений запасов почвенного органического углерода в зависимости от факторов окружающей среды (таксоны почв, расчлененность рельефа и климатические характеристики – температура и осадки), рассчитаных по умеренному климатическому сценарию E-GISS. Без учета экологической инерции, согласно полученному прогнозу, баланс запасов почвенного углерода к 2050 г. уменьшится на 1.27 кг/м^2 (или –3.47 %) и составит 35.29 кг/м^2 (в настоящее время 36.56 кг/м^2).

Прогнозное моделирование, запасы, почвенный органический углерод, умеренный климатический сценарий

PREDICTED CHANGES IN STOCKS OF SOIL ORGANIC CARBON UNDER THE MODERATE CLIMATE SCENARIO FOR NORTHERN EUROPEAN RUSSIA

A.V. Pastukhov

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

Predictive assessment of the regional soil organic carbon stocks has been carried out for the tundra and forest tundra in the northeastern part of European Russia. The obtained regional matrices and maps account for 83 % of the changes in soil organic stocks depending on the environmental factors (combined soil taxa, terrain dissection, and climate characteristics – temperature and precipitation), with the calculations based on the moderate climate scenario E-GISS. According to the prediction model (excluding the environmental inertia) the resulting soil organic carbon stocks will decrease by 1.27 kg/m^2 (–3.47 %) in 2050, i. e. soil organic carbon is predicted to be 35.29 kg/m^2, whereas current soil organic carbon stocks are estimated 36.56 kg/m^2.

Predictive modeling, stocks, soil organic carbon, moderate climate scenario

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный углерод органических соединений ($C_{орг}$) составляет наибольшую долю в наземной биосфере [*Jobbagy, Jackson, 2000*], поэтому его минерализация в результате потепления климата будет способствовать росту концентрации CO_2 в атмосфере. Потери почвенного углерода зависят от изменения температуры [*Davidson, Janssens, 2006*], влажности [*Ryan, Law, 2005*], нарушений почвенного покрова как в результате землепользования [*Post, Kwon, 2000*], так и из-за пожаров [*Harden et al., 2000*]. Чувствительность этих факторов к потеплению климата создает синергетический эффект обратной связи, который может ускорить или замедлить накопление парниковых газов в атмосфере [*Young, Steffen, 2009*].

В северных экосистемах мерзлотные почвы и многолетнемерзлые породы (ММП) содержат большие запасы углерода [*Tarnocai et al., 2009*], потери которых будут возрастать с изменением климата [*Zimov et al., 2006; Schuur et al., 2008*]. Согласно большинству современных климатических сценариев, на севере Европейской России ожидаются повышение среднегодовой температуры на 4–7 °С и увеличение количества зимних осадков к концу XXI в. [*Giorgi, 2006*].

Средние оценки запасов почвенного органического углерода для тундры и лесотундры Аркти-

© А.В. Пастухов, 2016

ки различаются в несколько раз у разных авторов. Потенциально эти экорегионы могут активно влиять на сам процесс изменения климата из-за огромных запасов углерода и быстрого таяния вечной мерзлоты [*Schuur et al., 2008*], поэтому для корректной оценки запасов важны пространственно распределенные наблюдения. В настоящее время активно разрабатываются и тестируются различные интегрированные модели, характеризующие пространственную картину и динамику запасов почвенного углерода [*Lawrence et al., 2008; Koven et al., 2011; Schaefer et al., 2011*]. Тем не менее остаются существенные различия между оценками, полученными в результате моделирования и экспериментально, прежде всего из-за низкого пространственного разрешения и грубой экстраполяции ограниченного числа наблюдений. Кроме того, все модели имеют ряд недостатков: отсутствие вертикального разрешения запасов углерода[1], нереальное пространственное представление разнообразия почвенного покрова, пренебрежение почвообразующими процессами, характерными для высокоширотных условий (криогенная агрегация, оподзоливание, оглеение, криотурбации и пр.). Несмотря на эти ограничения, моделирование часто используется для прогнозирования изменения запасов углерода в результате климатических флуктуаций. В зависимости от процессов и параметров, включенных в модель, получаются очень большие диапазоны потерь углерода, находящегося в многолетнемерзлом состоянии, при различных сценариях будущего потепления (например, $25 \cdot 10^{12}$–$85 \cdot 10^{12}$ кг) [*Koven et al., 2011*].

"Эталонные" значения запасов углерода (средние значения для почвенной таксономической единицы) пространственно неоднородны для больших (>100 км) регионов, поэтому необходим учет климата и рельефа для корректных оценок запасов углерода в таких регионах. Если зависимость содержания углерода от факторов окружающей среды (почвы, рельеф, климат) высокая, то для прогнозирования запасов углерода можно использовать эти факторы окружающей среды, построив не только пространственные, но и временные модели.

В предыдущих исследованиях [*Пастухов, 2016*] выявлена тесная связь между запасами углерода и факторами окружающей среды (агрегированные группы почв, мезорельеф, климатические характеристики): коэффициент детерминации $R^2 = 0.840$, статистическая значимость результата $p < 10^{-6}$. Такая высокая для экологических исследований корреляция позволяет утверждать, что запасы углерода напрямую зависят от указанных факторов [*Pastukhov et al., 2012*]. В отличие от "чистых" имитационных моделей, для пространственного моделирования нами используются реальные полевые данные, а не теоретические подходы. Это, во-первых, сводит к минимуму влияние субъективности при построении модели, во-вторых, позволяет эмпирически обоснованно выходить на уровень более широких географических обобщений.

В данной работе рассмотрены не только модели текущих запасов углерода, но и рассчитаны пространственно-временные генерализованные линейные модели (ГЛМ) запасов углерода, на основе которых построены растровые прогнозные карты изменения запасов углерода при умеренном климатическом сценарии E-GISS.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследований "Уса" находится на северо-востоке Европейской России, приурочен к бассейну р. Уса и характеризуется умеренно континентальным умеренно холодным климатом. На данной территории преобладает аккумулятивный ледниковый рельеф, морфологически представляющий собой пологохолмистую равнину с абсолютными высотами 60–190 м над уровнем моря, перекрытую мощным слоем четвертичных отложений. Холмы (мусюры) имеют неправильную форму с пологими длинными склонами и плоскими, часто заболоченными вершинами. Заболочены также разделяющие холмы низины. В долинах рек представлены поймы и первые надпойменные террасы.

Рассматриваемый регион находится в экотоне "тундра–лесотундра" со сплошной многолетней мерзлотой на севере и с островной многолетней мерзлотой в южной части. С мерзлотой тесно связано формирование криогенного микрорельефа. Бугорковатый и пятнисто-бугорковатый микрорельеф развит практически повсеместно на плакорах и в заболоченных депрессиях, но обычно отсутствует на участках, прилегающих к линиям стока, на склонах значительной крутизны, под склоновыми луговинами и на низких уровнях пойм. Столь широкое распространение микрорельефа определяет высокую сложность почвенного покрова на микроуровне с распространением почвенных комбинаций (комплексов), в которых почвы сменяют друг друга на расстояниях от десятков сантиметров до первых метров. Кроме того, в процессе формирования микрорельефа в почвах развиваются процессы криотурбации, которые приводят к нарушениям строения профиля и обогащению нижних горизонтов органическим веществом, механически занесенным из верхних. На

[1] Например, в некоторых моделях запасы углерода рассчитаны для метровой толщи почв, тогда как в торфяниках она может составлять несколько метров, что делает оценку запасов углерода крайне неточной.

болотах переходного типа формируется плоскобугристый микрорельеф. Мерзлотные (ММП залегают в первом метре толщи почвы) и немерзлотные (ММП залегают глубже 1 м от поверхности почвы) почвы имеют принципиально различный термический режим, даже если на местности их разделяет расстояние лишь в несколько десятков метров [*Мажитова, Каверин, 2007*]. Среднегодовые значения температур грунтов составляют от –0.5 до –2 °С. Для северной части района исследований (участок "Роговая 1") характерна сплошная многолетняя мерзлота, которая достигает значительной мощности (до 63–68 м), при этом температура мерзлых пород высокая и близка к 0 °С, под торфяниками и подветренными склонами она опускается до –2.5 °С. Таликовые окна приурочены к руслам рек и ручьев и, вероятно, к крупным озерам. Конфигурация верхней поверхности мерзлоты сложная и зависит от множества факторов: растительности, литологии пород, удаленности от водоемов и водотоков, гидрогеологического режима, мощности снегового покрова, форм рельефа и др. Наблюдается перемежаемость участков сливающейся и несливающейся мерзлоты, причем преобладают последние. Экотонные участки охватывают очень важные переходы в растительном покрове и развитии многолетней мерзлоты и являются наиболее чувствительными к изменениям климата. Характерны также протяженные реликтовые торфяные плато эпохи климатического оптимума голоцена и термокарстовые комплексы [*Пастухов, Каверин, 2013*].

На этих экотонных участках происходит переход от кустарничковых и ерниковых тундр к лесотундровым редколесьям и далее – к редкостойным северотаежным лесам, причем строение и состав растительных группировок обусловлены влиянием экологических факторов (солярная и ветровая экспозиция, мощность снежного покрова, глубина залегания многолетней мерзлоты). Северный предел произрастания лесной растительности в районах распространения многолетней мерзлоты обычно проходит по немерзлотным речным долинам, но нередко ель в бассейне р. Бол. Роговая растет непосредственно на Cryosols при близком залегании (<1 м) многолетней мерзлоты. На северной границе проникновения леса *Picea obovata* наряду с *Betula pubescens* являются доминантными видами. Кустарники *Salix* sp. и травы произрастают вдоль ручьев и заболоченных низменностей. Открытые фены (мочажины) и реликтовые торфяники с термокарстовыми комплексами типичны для данной территории. На немерзлотных мочажинах доминирует *Sphagnum* sp., тогда как на сухих торфяных буграх (пальзах и торфяных плато) обычно преобладают кустарнички, мхи и лишайники. В открытой тундре произрастают листопадные кустарнички или *Betula nana*, лишайники и мхи.

Сезоннопромерзающие (немерзлотные) почвы (Gleysols, Cambisols, Retisols) в регионе, как правило, формируются под высокой кустарниковой или лесной растительностью, где мощный снеговой покров зимой создает более теплый температурный режим почв. Сезоннопромерзающие Fluvisols развиваются также в поймах речных долин [*Мажитова и др., 2003*]. Для торфяных плато термокарстовых комплексов характерны комплексы Cryic Folic Histosols с близким залеганием ММП и сезоннопромерзающие Fibric Histosols мочажин, а также Fibric Floatic Histosols, развивающиеся в термокарстовых озерах, заполненных растительностью. Мерзлотные минеральные почвы (Cryosols), как правило, формируются на суглинистых наветренных ландшафтах под тундровой кустарничковой растительностью, где маломощный снежный покров способствует глубокому охлаждению почвы и сохранению многолетней мерзлоты в профиле [*Мажитова и др., 2003*]. В переходных элементах ландшафта достаточно мощные торфяные горизонты (10–40 см) также способствуют сохранению многолетней мерзлоты (Histic Cryosols, Histic Gleysols). В зоне сплошной многолетней мерзлоты в северо-восточной части участка "Уса" преобладают мерзлотные почвы – Cryosols, Cryic Histosols.

Для настоящего исследования была составлена база данных, содержащая все доступные описания профилей для среднего течения бассейна р. Уса с достоверными данными о запасах почвенного углерода, описания растительности и почв в системе Международной классификации WRB [*IUSS, 2014*]. Основные источники данных: 1) база данных Института биологии Коми НЦ УрО РАН, которая впервые была использована П. Кюхри с соавт. [*Kuhry et al., 2002*] и Г.Г. Мажитовой с соавт. [*Мажитова и др., 2003*]; 2) база данных, собранная по проекту CarboNorth в 2007–2008 гг., была применена Г. Хугелиусом с соавт. [*Hugelius et al., 2011*] и А.В. Пастуховым, Д.А. Кавериным [*2013*]. Места отбора: четыре небольших ключевых участка в переходной экотонной зоне "тундра–северная тайга" среднего течения бассейна р. Уса. Места отбора проб выбирались случайным образом, но не должны были захватывать бугорков или понижений. Для учета изменчивости мощности верхних органических горизонтов в зависимости от микрорельефа их образцы отбирались в трехкратной повторности (кроме торфяников). Подробно методология отбора, лабораторного анализа и расчетов запасов описана в [*Hugelius et al., 2011*] или [*Пастухов, Каверин, 2013*].

На участок исследований площадью 18 132.55 км^2 была построена цифровая почвен-

ная карта среднего течения р. Уса масштаба 1:300 000 с тематическим разрешением 15 почвенных групп и подгрупп по классификации WRB [*IUSS, 2014*]. Эта почвенная карта использована нами для оценки текущих и прогнозных запасов почвенного углерода в бассейне р. Уса. Все почвенные группы и подгруппы WRB были объединены в три таксономических класса, выделяемых по мощности органогенных горизонтов.

Основной вклад в запасы почвенного углерода вносят органогенные горизонты. Среднее содержание углерода в них в основном находится в диапазоне 30–35 %, а в минеральных горизонтах – менее 1 %. Поэтому в первый объединенный таксономический класс была включена почвенная группа Histosols (мощность органогенных горизонтов превышает 40 см), которая отличается очень высокими значениями запасов углерода. Для остальных почвенных групп характерна большая вариабельность запасов, однако их можно объединить в два почвенных таксона, различающихся по мощности органогенного горизонта. Первый таксон включает минеральные почвы с мощностью органогенных горизонтов от 0 до 10 см, второй – торфянисто-минеральные почвы с мощностью от 10 до 40 см.

Для моделирования и создания прогнозных карт изменения запасов углерода в пространстве и времени построена ГЛМ множественной регрессии [*Montgomery, Peck, 1982; McCullagh, Nelder, 1989*]. В моделях запасы почвенного углерода рассматриваются как отклик, который зависит от таких независимых переменных, как объединенные таксоны почв, характеристики климата и рельефа.

Сведения о слоях климатических данных взяты из базы WorldClim [*Hijmans et al., 2005*; http://www.worldclim.org]. Они имеют высокое разрешение (30″), получены интерполяцией и экстраполяцией данных от 47 554 метеостанций по осадкам и 24 542 станций по температуре (за исключением Антарктиды). Данные о рельефе GMTED2010 разрешения в плане 15″ представлены Геологической службой США [*Danielson, Gesch, 2011*]. Расчеты топографических признаков и статистическая обработка данных проводились с использованием программных пакетов “Аналитическая ГИС Эко” и R2 – разработчик П.А. Шарый [*Шарый и др., 2011; Shary et al., 2002; Shary, 2008*].

Для расчета прогноза изменений запасов использовался умеренный климатический сценарий. E-GISS – умеренная модель Годдарского института космических исследований, НАСА. Среднегодовая температура по планете составляла 14.6 °C в 2012 г., что на 0.6 °C теплее, чем в середине XX в. Среднегодовая температура возросла на 0.8 °C с 1880 г. (по данным 1000 метеостанций).

В результате были построены уравнения регрессии ГЛМ вида

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

где W – отклик (запасы почвенного органического углерода); 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.

РАСЧЕТ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЙ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА

Прогноз изменений запасов углерода в почвах тундры и лесотундры северо-востока Европейской России, вызванных глобальными изменениями климата, проведен в несколько этапов.

I. ***Построение пространственной модели запасов углерода, содержащей в качестве предикторов одновременно климатические характеристики сумм осадков и температур*.**

1. Пространственная модель запасов углерода, использующая в качестве пространственных предикторов суммы осадков июля и июня, имеет вид [*Пастухов, 2016*]

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

$$R^2 = 0.840\ (Degr = 1.5\ \%),\ p < 10^{-6},$$

где A_{110} – 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; нижние индексы +16.92, –5.29, –4.17, +2.66 – значения t-статистик[2]; $P_{июл}$, $P_{июн}$ – сумма осадков июля и июня; Z – абсолютная высота; $rot^{П}$ – одна из преобразованных (верхний индекс “П”) морфометрических величин[3], обозначающих расчлененность рельефа. Модель логарифмирована, так как учитывает существенное отклонение статистического распределения $C_{орг}$ от нормального, которое связано с особой ролью таксонов почв в условиях этого региона. Модель верифицирована методом кроссвалидации Аллена с использованием критерия деградации (*Degr*), значение которого составляет 1.5 % при допустимых в экологии и почвоведении 50 % [*Шарый и др., 2011*].

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

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

Модель (1) показывает, что на 84 % пространственное распределение запасов углерода ln ($C_{орг}$) зависит от таксонов почв, характеристик климата (осадки июня $P_{июн}$ и июля $P_{июл}$) и рельефа (Z – высота, *rot* – расчлененность рельефа); все предикторы значимы в модели, т. е. главным было различие между торфяниками (Histosols) и другими таксонами почв (индикатор I_1 отличает органогенные почвы от остальных таксонов почв). Другими важными факторами были осадки июня $P_{июн}$, учитывающий высоту член I_2Z и учитывающий расчлененность рельефа местности член $I_2 rot^{П}$. Это уравнение используется для пространственного расчета запасов углерода.

2. Пространственная модель запасов углерода, использующая в качестве пространственных предикторов сумму осадков июня $P_{июн}$ и максимальную температуру июля $T^{max}_{июл}$, имеет вид

$$\ln (C_{орг})_{A110} = 0.074\,873\,4 \cdot I_1 T^{max}_{июл+16.29} -$$
$$- 0.170\,931 \cdot P_{июн-6.08} - 0.018\,450\,4 \times$$
$$\times I_2 T^{max}_{июл-3.95} + 0.041\,644\,1 \cdot I_2\, rot^{П}_{+2.57} + 8.880\,005, \quad (2)$$
$$R^2 = 0.833\ (Degr = 1.5\ \%),\ p < 10^{-6}.$$

Из модели (2) следует, что 83.3 % пространственной изменчивости ln ($C_{орг}$) объясняется таксонами почв, климатом (максимальной температурой июля $T^{max}_{июл}$ и суммой осадков июня $P_{июн}$) и рельефом. Первый предиктор $I_1 T^{max}_{июл}$ самый значимый и имеет отношение только к торфяникам: с увеличением максимальной температуры июля возрастают запасы органического вещества в торфяниках. Для парной корреляции линейного характера между $I_1 T^{max}_{июл}$ и ln ($C_{орг}$) имеем $R^2 = 0.741$. Важными факторами по-прежнему остаются сумма осадков июня $P_{июн}$ и учитывающий расчлененность рельефа местности член $I_2 rot^{П}$. Член $I_2 T^{max}_{июл}$, учитывающий максимальную температуру июля для минеральных почв, заменяет $I_2 Z$. Коэффициент детерминации в уравнении (2) немного ниже, чем для модели (1), но мы будем использовать модель (2), поскольку помимо характеристик осадков для расчета прогнозных изменений запасов углерода необходим учет изменений температуры.

3. Пространственная модель запасов углерода, использующая в качестве пространственных предикторов все суммы осадков июля, июня, входящие в уравнение (1), и максимальную температуру июля, имеет вид

$$\ln (C_{орг})_{A110} = -0.003\,648\,12 \cdot I_1 (P_{июл} - 23.37 \cdot T^{max}_{июл-16.24}) -$$
$$- 0.165\,592 \cdot P_{июн-5.87} - 0.018\,520\,7 \cdot I_2 T^{max}_{июл-3.95} +$$
$$+ 0.041\,421\,1 \cdot I_2\, rot^{П}_{+2.55} + 8.664\,110, \quad (3)$$
$$R^2 = 0.833\ (Degr = 1.5\ \%),\ p < 10^{-6}.$$

Модель (3) повторяет все предикторы модели (2), за исключением первого, где вместо $I_1 T^{max}_{июл}$ используется $I_1 (P_{июл} - 23.37 \cdot T^{max}_{июл})$ – инвариант или устойчивое сочетание осадков июля и максимальной температуры июля, рассчитанное в специальной программе, для того чтобы в прогнозных расчетах сохранить осадки двух месяцев и добавить температурную характеристику. Уравнение (3) объясняет 83.3 % пространственной изменчивости ln ($C_{орг}$) таксонами почв, инвариантом температуры $T^{max}_{июл}$ с суммой осадков июля, осадков июня и расчлененностью рельефа. Коэффициент детерминации в модели (3) немного ниже, чем в (1), но данную модель целесообразно использовать для прогноза, поскольку в ней учитываются не только суммы осадков июля и июня, но и максимальные температуры июля для торфяников и для автоморфных почв. Для парной корреляции линейного характера между $I_1 (P_{июл} - 23.37 \cdot T^{max}_{июл})$ и ln ($C_{орг}$) получим $R^2 = 0.744$.

II. ***Расчет матриц прогнозируемых климатических показателей.***

Для расчета матриц прогнозируемых климатических показателей используются планетарные данные об изменениях температур и осадков с сайта НАСА (Годдардовский центр) с шагом 4 × 5° в формате TXT. Данные преобразуются с помощью программы “Аналитическая ГИС Эко” в ее внутренний формат REG. Далее в той же программе в несколько этапов осуществляется интерполяция данных методом Делоне для получения матрицы с шагом решетки 0.63°. Полученная матрица преобразуется в векторные данные (точки), затем – в заданную проекцию. Набор точек с прогнозными данными используется как отклик в уравнении множественной регрессии, где в качестве переменных выступают базовые значения соответствующих климатических показателей, географические данные, характеристики рельефа.

Ниже приведено уравнение регрессии, описывающее связи прогнозируемых изменений суммы осадков июля на 2050 г. по сценарию E-GISS ($\Delta P_{июл}$_G50)[4] с базовыми значениями суммы осадков июля ($P_{июл}$_BASE), координатами X и $(X + Y)/2^{1/2}$:

$$\Delta P_{июл}_G50 = -1.505\,066 \cdot X - 0.539\,999 \cdot P_{июл}_BASE -$$
$$- 0.411\,735 \cdot (X + Y)/2^{1/2} + 3.743\,639, \quad (4)$$
$$R^2 = 0.836,\ p < 10^{-6}.$$

В уравнении (4) связи весьма тесные (R^2 = = 0.836). Для изучаемого региона прогнозируемые изменения сумм осадков июля возрастают со снижением базовых осадков июля ($P_{июл}$_BASE) при продвижении на запад (долгота X с отрицательным знаком связи) и на юго-запад (переменная

[4] Величина $\Delta P_{июл}$_G50 – разность прогнозируемых изменений суммы осадков июля на 2050 г. по сценарию E-GISS и базовых (текущих) значений суммы осадков июля.

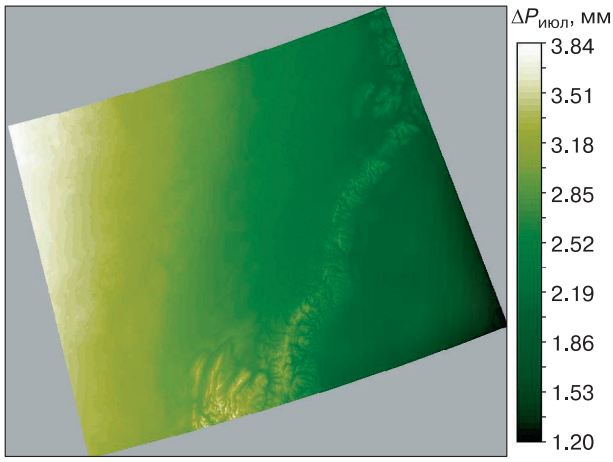

Рис. 1. Карта (матрица) изменений суммы осадков июля на 2050 г. ($\Delta P_{\text{июл}}$, мм) по прогнозной модели (4) и климатическому сценарию E-GISS.

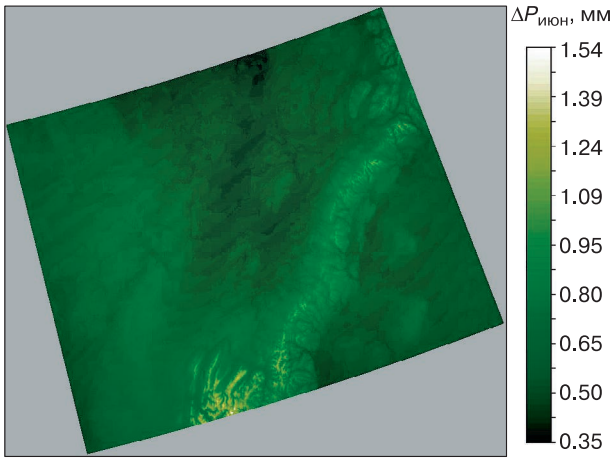

Рис. 2. Карта (матрица) изменений суммы осадков июня на 2050 г. ($\Delta P_{\text{июн}}$, мм) по прогнозной климатической модели E-GISS.

$(X + Y)/2^{1/2}$ с отрицательным знаком). Карта изменений $P_{\text{июл}}$_G50, построенная на основе выявленных связей, приведена на рис. 1.

Прогнозируемые изменения осадков июня на 2050 г. по сценарию E-GISS ($\Delta P_{\text{июн}}$_G50) с базовыми значениями осадков июня ($P_{\text{июн}}$_BASE), координатами X и $(X + Y)/2^{1/2}$ описывает следующая модель:

$$\Delta P_{\text{июн}}\text{_G50} = -0.895\,675 \cdot X + 0.759\,441 \cdot (X + Y)/2^{1/2} + \\ + 0.645\,738 \cdot P_{\text{июн}}\text{_BASE} + 0.317\,421, \qquad (5)$$

$$R^2 = 0.415,\ p < 10^{-2}.$$

В уравнении (5) для $\Delta P_{\text{июн}}$_G50 связи менее тесные ($R^2 = 0.415$). Прогнозируемые изменения сумм осадков июня увеличиваются с ростом базовой суммы осадков июня ($P_{\text{июн}}$_BASE) при продвижении на запад (долгота X с отрицательным знаком) и на северо-восток (переменная $(X + Y)/2^{1/2}$ с положительным знаком). Карта изменений $P_{\text{июн}}$_G50, построенная по уравнению (5), представлена на рис. 2.

Ниже приведена модель, которая описывает связи прогнозируемых изменений максимальной температуры июля на 2050 г. по сценарию E-GISS ($\Delta T^{\max}_{\text{июл}}$_G50) с базовыми значениями максимальной температуры июля ($T^{\max}_{\text{июл}}$_BASE), координатами X и $(X - Y)/2^{1/2}$:

$$\Delta T^{\max}_{\text{июл}}\text{_G50} = 0.055\,02 \cdot T^{\max}_{\text{июл}}\text{_BASE} + 0.354\,284 \cdot X + \\ + 0.207\,777 \cdot (X - Y)/2^{1/2} + 0.121\,935, \qquad (6)$$

$$R^2 = 0.983,\ p < 10^{-6}.$$

В уравнении (6) связи очень тесные ($R^2 = 0.983$). Из него следует, что для изучаемого региона прогнозируемые изменения максимальной температуры июля возрастают с ростом базовой максимальной температуры при продвижении на восток (переменная X с положительным знаком) и на юго-восток (переменная $(X - Y)/2^{1/2}$ с положительным знаком). Построенная на основе выявленных связей карта изменений $\Delta T^{\max}_{\text{июл}}$_G50 приведена на рис. 3.

III. *Расчет изменения запасов органического углерода на основе пространственных моделей для базового периода и данных прогнозируемых температур и осадков по выборке.*

Рассчитаны следующие средние изменения климатических характеристик к 2050 г. по модели E-GISS по выборке (110 точек), полученные при использовании карт-матриц (см. рис. 1–3):

1) суммы осадков июля ($P_{\text{июл}}$) – увеличение с 54.38 мм на (2.59 ± 0.04) мм (т. е. 4.76 %);

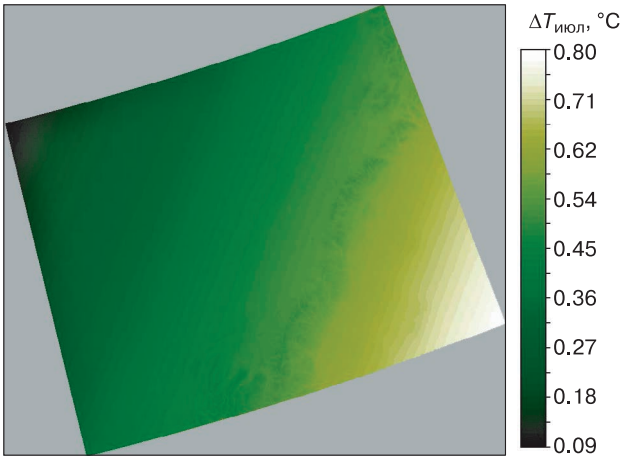

Рис. 3. Карта (матрица) изменений максимальной температуры июля на 2050 г. ($\Delta T_{\text{июл}}$, °C) по прогнозной климатической модели E-GISS.

2) суммы осадков июня ($P_{\text{июн}}$) – увеличение с 41.22 мм на (0.43 ± 0.04) мм (т. е. 1.05 %);

3) максимальной температуры июля ($T^{\max}_{\text{июл}}$) – увеличение с (18.89 ± 0.15) °C на 0.41 °C (т. е. 2.15 %);

4) стабильного пространственного сочетания между суммой осадков июля и максимальной температурой июля ($P_{\text{июл}} - 23.37 \cdot T^{\max}_{\text{июл}}$) – снижение данного сочетания с –387.19 ± 3.55 на 6.89 (т. е. 1.78 %).

При использовании уравнения (1), в котором производится замена базовых значений $P_{\text{июл}}$ и $P_{\text{июн}}$ на прогнозируемые в 110 точках, получаем:

1) среднее значение прогнозируемых запасов углерода в исследуемом регионе к 2050 г. составит 38.29 кг/м^2;

2) среднее значение базовых запасов углерода по уравнению (1) составляет 36.49 кг/м^2;

3) изменение запасов почвенного углерода к 2050 г. будет +1.80 кг/м^2, или +4.92 %.

Расчет изменения запасов $C_{\text{орг}}$ по уравнению (1) без учета экологической инерции (задержка во времени процессов преобразования почвенного углерода не учитывается) прогнозирует депонирование углерода в почвах изученного региона почти на 5 %. В уравнении (1) присутствует два "конфликтующих" предиктора $P_{\text{июл}}$ и $P_{\text{июн}}$ (первый со знаком плюс в модели, второй со знаком минус), увеличение первого должно приводить к росту запасов углерода, увеличение второго – к эмиссии. Поскольку к 2050 г. по принятому сценарию $P_{\text{июл}}$ возрастает на 4.76 %, а $P_{\text{июн}}$ – лишь на 1.05 %, "конфликт" разрешается в пользу депонирования. По таксонам почв в выборке средние значения баланса углерода следующие: торфяники +5.72 кг/м^2 (или +6.58 %), минеральные почвы –0.02 кг/м^2 (или –0.18 %), торфянисто-минеральные почвы –0.02 кг/м^2 (или –0.09 %). Модель (1) прогнозирует увеличение запасов углерода в торфяниках, соизмеримое с возрастанием сумм осадков июля, и очень слабое снижение запасов в других таксонах почв.

Модель (2), в которой базовые значения $T^{\max}_{\text{июл}}$ и $P_{\text{июн}}$ заменяются на прогнозируемые в 110 точках, дает следующие результаты:

1) среднее значение прогнозируемых запасов углерода к 2050 г. – 35.52 кг/м^2;

2) среднее значение базовых запасов углерода по уравнению (2) составляет 36.55 кг/м^2;

3) изменение запасов почвенного углерода к 2050 г. будет –1.03 кг/м^2 (или –2.82 %).

Модель (2) также без учета экологической инерции прогнозирует снижение или эмиссию углерода в почвах изученного региона почти на 3 %. В уравнении (2) также присутствуют два "конфликтующих" предиктора $I_1 T^{\max}_{\text{июл}}$ и $I_2 T^{\max}_{\text{июл}}$ (первый со знаком связи плюс, второй со знаком минус), увеличение первого должно приводить к росту запасов углерода, увеличение второго – к эмиссии. В модели (2) присутствует еще один климатический предиктор $P_{\text{июн}}$, и влияние его роста на запасы углерода отрицательное. К 2050 г. по принятому сценарию $P_{\text{июн}}$ увеличивается на 1.05 %, в результате этого баланс отрицателен. Средние значения баланса углерода в выборке по таксонам почв следующие: торфяники –1.53 кг/м^2 (или –1.91 %), минеральные почвы –0.68 кг/м^2 (или –5.89 %), торфянисто-минеральные почвы –0.91 кг/м^2 (или –5.20 %). Модель (2) прогнозирует незначительное уменьшение запасов углерода в торфяниках, соизмеримое с возрастанием сумм осадков июня (снижающим запасы во всех таксонах), и заметное уменьшение запасов в двух других таксонах почв.

Используя модель (3), в которой производится замена базовых значений $P_{\text{июл}}$, $P_{\text{июн}}$ и $T^{\max}_{\text{июл}}$ на прогнозируемые в 110 точках, получаем показатели:

1) среднее значение прогнозируемых запасов углерода к 2050 г. составит 35.29 кг/м^2;

2) среднее значение базовых запасов углерода по уравнению (3) равно 36.56 кг/м^2;

3) изменение запасов почвенного углерода к 2050 г. будет –1.27 кг/м^2 (или –3.47 %).

Модель (3) без учета экологической инерции прогнозирует снижение запасов углерода в почвах почти на 3.5 %. В уравнении (3) в качестве предикторов присутствует наибольший набор климатических показателей $P_{\text{июл}}$, $P_{\text{июн}}$ и $T^{\max}_{\text{июл}}$. Возрастание всех климатических предикторов к прогнозному сроку приводит к снижению запасов углерода во всех таксонах почв. Приведем средние значения баланса углерода в выборке по таксонам почв: для торфяников –2.19 кг/м^2 (или –2.76 %), для минеральных почв –0.71 кг/м^2 (или –6.19 %), для торфянисто-минеральных почв –0.96 кг/м^2 (или –5.26 %).

ВЫВОДЫ

Анализ трех пространственно-временных моделей с разными климатическими предикторами для одной выборки и одного прогнозного климатического сценария позволяет увидеть, насколько близки результаты и насколько устойчив прогноз.

Расчет изменения запасов углерода по уравнению (1) без учета экологической инерции (задержка во времени процессов преобразования почвенного углерода не учитывается) прогнозирует депонирование углерода в почвах изученного региона почти на 5 %.

Модель (2) также без учета экологической инерции прогнозирует снижение или эмиссию углерода в почвах изученного региона примерно на 3 %.

Модель (3) без учета экологической инерции прогнозирует снижение запасов углерода в почвах почти на 3.5 %.

Включение в пространственно-временные модели осадков и температуры дает возможность оценить их совместное действие. В исследовании все климатические предикторы были статистически значимыми. Поэтому интересна модель (3), учитывающая две климатические характеристики – сумму осадков и температуру. В модели (1) самая тесная связь изменений запасов почвенного органического углерода и факторов окружающей среды, и для пространственных расчетов необходимо использовать ее. По модели (3) прогнозируется небольшое снижение запасов углерода в почвах (–3.47 %), сопоставимое с изменением климатических предикторов в процентном отношении.

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 проекта № 15-2-4-28 "Биогеохимические процессы как основа устойчивого функционирования почв Арктики в условиях меняющейся природной среды (на примере равнинных и горных экосистем)" Комплексной программы УрО РАН 2015–2017 гг.

Литература

Мажитова Г.Г., Каверин Д.А. Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 20–30.

Мажитова Г.Г., Казаков В.Г., Лопатин Е.В., Виртанен Т. Геоинформационная система для бассейна р. Усы (Республика Коми) и расчет запасов почвенного углерода // Почвоведение, 2003, № 3, с. 133–144.

Пастухов А.В. Методология пространственного моделирования запасов почвенного органического углерода на севере Европейской России // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 3, с. 33–42.

Пастухов А.В., Каверин Д.А. Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение, 2013, № 9, с. 1084–1094, doi: 10.7868/S0032180X13070083.

Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агрохимия, 2011, № 2, с. 57–81.

Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // U.S. Geolog. Survey Open-File Rep. 2011-1073, 2011, 26 p.

Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature, 2006, vol. 440, p. 165–173, doi: 10.1038/nature04514.

Giorgi F. Climate change hot-spots // Geophys. Res. Lett., 2006, vol. 33, iss. L08707, p. 1–4, doi: 10.1029/2006GL025734.

Harden J.W., Trumbore S.E., Stocks B.J. et al. The role of fire in the boreal carbon budget // Glob. Change Biol., 2000, vol. 6, p. 174–184, doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.06019.x.

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, p. 1965–1978, doi: 10.1002/joc.1276.

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, iss. G03024, p. 1–14, doi: 10.1029/2010JG001606.

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. Rep. 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.

Koven C.D., Ringeval 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.

Kuhry P., Mazhitova G.G., Forest P.-A. et al. Upscaling soil organic carbon estimates for the Usa Basin (Northeast European Russia) using GIS-based landcover and soil classification schemes // Danish J. Geography, 2002, vol. 102, p. 11–25.

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.

McCullagh P. Generalized Linear Models. Second ed. / P. McCullagh, J.A. Nelder. London, Chapman and Hall, 1989, 532 p.

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

Pastukhov A.V., Sharaya L.S., Sharyi P.A., Kaverin D.A. The spatial distribution of SOC in the forest tundra of the European North-East // Tenth Intern. Conf. on Permafrost: Abstr. Salekhard, Northern Publ., 2012, vol. 4, p. 443.

Post W.M., Kwon K.C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // Glob. Change Biol., 2000, vol. 6, p. 317–327, doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x.

Ryan M.G., Law B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // Biogeochemistry, 2005, vol. 73, p. 3–27, doi: 10.1007/s10533-004-5167-7.

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., 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.

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, iss. GB2023, p. 1–11, doi: 10.1029/2008GB003327.

Young O.R., Steffen W. The Earth System: Sustaining planetary life-support systems // Principles of Ecosystem Stewardship. New York, Springer, 2009, p. 295–315.

Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M. et al. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool // Geophys. Res. Lett., 2006, vol. 33, iss. L20502, p. 1–5, doi: 10.1029/2006GL027484.

Поступила в редакцию
30 апреля 2015 г.