

MOSCOW REGION'S SWAMP FORESTS MAPPING FOR INVENTORY OF SOIL CH₄ AND CO₂ FLUXES

Ilyasov D.V.^{1*}, Mochenov S.Y.¹, Rokova A.I.², Glagolev M.V.^{1,2,3}, Kupriianova I.V.¹,
Suvorov G.G.¹, Sabrekov A.F.¹, Terentieva I.E.⁴

¹⁾ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

²⁾ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

³⁾ Институт лесоведения РАН, г. Успенское (Московская область)

⁴⁾ University of Calgary, Calgary

*d_ilyasov@ugrasu.ru

Citation: Ilyasov D.V., Mochenov S.Y., Rokova A.I., Glagolev M.V., Kupriianova I.V., Suvorov G.G., Sabrekov A.F., Terentieva I.E. 2023. Moscow region's swamp forests mapping for inventory of CH₄ and CO₂ fluxes. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 116-131.

DOI: 10.18822/edgcc568952

Учет непостоянных источников метана и диоксида углерода, характеризующихся большой изменчивостью потоков в пространстве и/или во времени необходим для полноценной инвентаризации бюджета углерода в наземных экосистемах России. В статье представлена простейшая инвентаризация годовой эмиссии метана и диоксида углерода почвами заболоченных лесов Московской области, основанная на трехлетнем мониторинге потоков CH₄ и CO₂ и карты их распространения в рассматриваемом регионе, построенной на основе спутниковых данных Landsat-8. Суммарная площадь заболоченных лесов различной степени увлажнения в Московской области составила 292 249 га. Общая точность классификации составила 76%. Эмиссия метана из экосистем заболоченных лесов составила 0.25 (1Q – 0.02; 3Q – 1.45) MmCO₂-экв в год, диоксида углерода 5.40 (1Q – 2.16; 3Q – 9.92) MmCO₂ в год.

Ключевые слова: заболоченные леса, ГИС-картография, эмиссия метана, Landsat-8.

Introduction. Methane and carbon dioxide are the most important greenhouse gases, the increase in the concentration of which in the atmosphere is the main cause of climate change [Taylor and Penner, 1994; Drösler et al., 2014; Hoegh-Guldberg et al., 2019]. In addition to relatively constant sources of methane and carbon dioxide into the atmosphere (such as oligotrophic bogs of the boreal zone), there are sporadic sources (SS): intermittently flooded floodplains, boreal swamp forests, some intermittently swamp forests, etc. Despite the variability of SS as sources of methane, CH₄ fluxes in floodplains and in swamp forests can reach 0.1–12.5 [Whalen et al., 1991; Van Huissteden et al., 2005; Terentieva et al., 2019] and 0.7 – 17.1 mgC m⁻² h⁻¹ [Moore and Knowles, 1990; Ambus and Christensen, 1995; Aronson et al., 2012; Koskinen et al., 2016; Glagolev et al., 2018], respectively. These values are comparable, and exceed those observed in bogs under certain conditions (a combination of soil moisture and temperature, and other factors) [Gulledge and Schimel, 2000; Vasconcelos et al., 2004; Ullah and Moore, 2011; Shoemaker et al., 2014; Christiansen et al., 2017; Torga et al., 2017; Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018]. Unfortunately, in Russia, studies of CH₄ and CO₂ fluxes from sporadic sources are extremely limited (one-time measurements were performed without reference to spatial, seasonal, and interannual variability of conditions) and were carried out mainly in Western Siberia [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentieva et al., 2019] and the European part of Russia [Kuznetsov and Bobkova, 2014; Ivanov et al., 2018; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022]. In general, medium-scale (at the Federal subject level) studies of bogs and forests in Russia have not been carried out in all regions, although they are of particular interest due to the possibility of maintaining a balance between the detailing of estimates and the magnitude of spatiotemporal coverage [Zatsarinnaya and Volkova, 2011; Grishutkin et al., 2013; Baisheva et al., 2015; Ilyasov et al., 2019; Suslova, 2019]. Besides, estimates made throughout the country require clarification at the regional level [Vompersky et al., 2005]. The aim of our work was the simplest inventory of swamp forests of the Moscow region as sources of CH₄ and CO₂ using GIS mapping and field measurements.

Objects and methods. The basis for the map of swamp forests of the Moscow region (hereinafter, by this term we mean the total territory of Moscow and the Moscow region) was a mosaic of 6 Landsat-8 satellite images. The mapping was carried out using the Supervised Classification algorithm in the Multispec program (Purdue Research Foundation, USA). For each decryption class, at least 7 training polygons were set and the classification module was launched using the maximum likelihood estimation. After the classification, the decryption classes were combined into typological ones: “forest” (automorphic forests), “water surfaces” (rivers, lakes, other water bodies), “swamp forest” (excessively moist forests with a water table level (WTL), predominantly located on the soil surface or close to it) and “wet forest” (excessively moist forests with predominant WTL below the soil surface). We considered the classes of swamp forests and wet forests, regardless of the presence or absence of peat layer in them: the key criterion was WTL. To assess the accuracy of the classification, an error matrix was compiled. For that purpose, on the resulting map, the first operator identified 75 points evenly distributed in space within each typological class; the coordinates of these points without specifying the belonging to the class were randomly sorted and passed to the second operator. Further, the points were assigned to one of the mapped classes based on “blind” visual expert interpretation using ultra-high resolution satellite images. The overall classification accuracy was determined as the ratio of the sum of points, whose mapped and real classes coincide, to the total number of points (Table 1).

Measurements of carbon dioxide and methane fluxes were carried out from 2019 to 2022 in the Dorokhovo mixed black alder moist grass forest, located 66 km west of the border of Moscow, using the static chamber method [Hutchinson and Mosier, 1981; Terent'eva et al., 2017]. Opaque chambers were used in the measurements, so the term “CO₂ flux” used in the paper implies the sum of the respiration of the soil-grass-moss cover. The calculation of the annual flux of methane and carbon dioxide from the swamp forests of the Moscow region was performed seasonally using the simplest inventory method [Glagolev, 2010]:

$$E = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times f_i \times T_j)$$

where A_{ij} – is the area (m²) occupied by the i -th source type in the j -th region; f_i – is the surface flux density (mgC m⁻² h⁻¹), characteristic of the i -th source type; T_j – is the duration of the emission period (hour), characteristic of the j -th region. The duration of the methane emission period within individual seasons was taken on the basis of hydrothermal coefficients and the radiation index as follows: summer – 122 days (from June to September inclusive), autumn – 76 days (from October to mid-December), winter – 90 days (from mid-December to mid-March), spring – 77 days (from mid-March to the end of May). The surface flux density was calculated as the median (and also 1Q, 3Q) for the considered season based on all observations.

Results. The resulting map of swamp forests of the Moscow region is shown in Figure 1 and is characterized by the following areas of typological classes: “forest” - 2,157,716 ha, “water surfaces” 45,693 - ha, “swamp forest” - 58,384 ha, “wet forest” - 233,865 ha. Thus, the total share of forest ecosystems that are able to function as sources of methane - swamp forests and wet forests - is 1.2 and 5.0% of the region's area, respectively (in total 292,249 ha). According to the map, swamp forests are predominantly small ecosystems (from small ones with an area of 3-5 ha, which are extremely widespread, to larger ones, with an area of 30-50 ha, which are somewhat less common), which are exposed to excessive moisture as a result of their location on the outskirts of wetland massifs, near river floodplains, in small local relief depressions, as well as in elements of a ravine-gully planting (mainly in the southern part of the Moscow region). Wet forests are located in more drained areas, often associated with swamp forests in a single landscape structures, but they are much more widespread, and often occupy significantly larger areas: from 10–50 to 100–500 ha.

The error matrix of the resulting map is presented in Table. 1. The overall classification accuracy (the ratio of the sum of the elements of the main diagonal of the error matrix to the sum of checkpoints by class) is 76%. Water surfaces with the highest possible producer's accuracy (100%) are most accurately identified. The “other” class has the same user's accuracy as water surfaces (93%), but poorly less producer's accuracy (74%). In general, the classes of swamp and wet forests are the least accurately defined (36–46%): they have significant intersections with all classes except that for the open water surface, and, most importantly, with each other. In order to achieve a reasonable classification accuracy and to make further calculations of the regional flow, we combined the “swamp forest” and “wet forest” classes into one: in this case, the user's accuracy of the combined class was 65%, and the producer's accuracy was 74%, which allows us to fairly accurately predict the location of forests of varying degrees of waterlogging when they are considered together.

Generalized results of measurements of methane and carbon dioxide fluxes by seasons and their brief statistical characteristics are presented in Table. 2. The simplest inventory based on the proposed approach makes it possible to estimate the methane flux from the soils of swamp forests with different degrees of waterlogging at 6666 tC yr^{-1} ($1Q - 407$; $3Q - 38790$); carbon dioxide at 1.5 MtC yr^{-1} ($1Q - 0.6$; $3Q - 2.7$). Taking into account the 100-year global warming potential for methane equal to 28 [Drösler et al., 2014], the total emission of methane and carbon dioxide from the soils of swamp forests with different degrees of waterlogging was $5.7 \text{ MtCO}_2\text{-eq yr}^{-1}$ ($1Q - 2.2$; $3Q - 11.4$)¹. More detailed information obtained on the basis of the simplest inventory presents in table 3.

Discussion. According to the data of the Great Russian Encyclopedia [Osipov et al., 2004], the area of automorphic forests in the Moscow region in 2015 amounted to 1,896,000 ha, which is in good agreement with the data obtained based on the current classification (the area of the “forest” class amounted to 2,157,716 ha). The distribution of swamp forests in the north of the Moscow region, observed on the resulting map, corresponds to swamp black alder, downy birch forests, as well as forests with gray alder on the map of G.N. Ogureeva et al. [1996]. In the southeastern part of the Moscow region, the areas occupied by swamp forests, according to the results of satellite data classification, are identical to the distribution of downy birch and pine-spruce-long-moss-sphagnum forests along the edges of wetlands. Wet forests are located to the south of the Ruza Reservoir correspond to spruce forests with gray alder, whereas those located to the northwest of the town of Klin are associated with black alder forests and pine-spruce forests with black alder (Ogureeva et al., 1996). The area occupied by swamp and wet forests identified in the current work is comparable to that of distribution of forests with black and gray alder (5.01 and 1.44% of the area of the region) provided in (Kotlov and Chernenkova, 2020), which indirectly confirms the assessment adequacy of the share of the territory occupied by wetland forest ecosystems identified in our work.

One of the main problems of GIS cartography based on remote sensing data is the poor availability of ground-based data or the inability to check map errors by field methods due to the wide coverage of the study area. However, the classification accuracy of 60-70% is the rule rather than the exception [Kotlov and Chernenkova, 2020] and is considered satisfactory. We anticipate that GIS mapping that combines multiple cartographic sources at its core (for example, by calculating a median estimate based on multiple maps) will improve the final result in the future.

Conclusion. The total area of swamp forests and wet forests in the Moscow Region is 292,249 ha. The emission of methane from these ecosystems is $0.25 \text{ (} 1Q - 0.02$; $3Q - 1.45) \text{ MtCO}_2\text{-eq per year}$, whereas that of carbon dioxide is $5.40 \text{ (} 1Q - 2.16$; $3Q - 9.92) \text{ MtCO}_2 \text{ per year}$. The highest total emission of methane and carbon dioxide from wetlands is observed in the summer-autumn period, gradually decreasing by the beginning of winter and increasing again (to the level of autumn values) in spring. The value of the total emission of the main carbon-containing gases from the soils of swamp forests of the European part of the Russian Federation should be taken into account when quantifying all significant sources and sinks.

Key words: swamp forests, GIS-cartography, methane emission, Landsat-8.

¹ The annual total methane flux was calculated as follows: the median of measurements for each of the season (0.14, 0.74, 0.02 and $0.25 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, for summer, autumn, winter and spring, respectively) was multiplied by the number of hours in days, by the corresponding length of the season (122, 76, 90 and 77 days), then by the wetland forest area ($2.922 \times 10^9 \text{ m}^2$), and finally by a correction factor (10^{-9}) to convert mgC to tC . The annual total carbon dioxide flux was calculated in a similar way (the difference was in the value of the correction factor, which was 10^{-15} for converting mgC to MtC). When converting the CH_4 flux (expressed in tC yr^{-1}) to $\text{MtCO}_2\text{-eq yr}^{-1}$, the original value was multiplied by 16/12 (the ratio of the molar mass of CH_4 to the molar mass of C), then by 28 (100-year global warming potential) and, finally, by a correction factor (10^{-6}) to convert tons to megatons. To calculate the total flux consisting of emissions of CH_4 ($\text{MtCO}_2\text{-eq year}^{-1}$) and CO_2 (MtC year^{-1}), the latter was multiplied by 44/12 (the ratio of the molar mass of CO_2 to the molar mass of C) and added.

ВВЕДЕНИЕ

Используемые сокращения

н.у.м. – над уровнем моря;
СИ – спорадические источники;
УПГВ – уровень почвенно-грунтовых вод;
Q – квартиль.

Заболоченные леса как спорадические источники метана

Метан и диоксид углерода – важнейшие парниковые газы, рост концентрации которых в атмосфере является основной причиной климатических изменений [Taylor and Penner, 1994; Drösler et al., 2014; Hoegh-Guldberg et al., 2019]. Одним из основных естественных источников метана и важным элементом круговорота диоксида углерода между наземными экосистемами и атмосферой являются болота [Matthews and Fung, 1987; Moore, 2002; Drösler et al., 2014].

Некоторые болотные экосистемы, например, олиготрофные бореальные, характеризуются относительным постоянством факторов метаногенеза и обмена диоксида углерода [Kelly and Chynoweth, 1981; Megonigal et al., 2004; Mitsch et al., 2013; Davydov et al., 2021]. Другие – напротив, резко меняющимися условиями увлажнения, температурного режима почвы и других экологических параметров, что приводит к существенной пространственно-временной изменчивости потоков метана и диоксида углерода [Whalen et al., 1991; Gullledge and Schimel, 2000; Koskinen et al., 2016]. Такими экосистемами являются периодически затопляемые поймы рек, заболоченные леса бореальной зоны, леса периодического избыточного увлажнения и др. (здесь и далее спорадические источники – СИ; под заболоченными лесами мы подразумеваем любые леса, характеризующиеся постоянным или периодическим избыточным увлажнением, т.е. УПГВ, приближающимся или оказывающимся выше поверхности почвы в течение всего года или отдельных сезонов) [Whalen et al., 1991; Gullledge and Schimel, 2000; Koskinen et al., 2016; Terentieva et al., 2019].

Несмотря на непостоянство СИ как источников метана, потоки в поймах рек могут достигать 0.1 – 12.5 [Whalen et al., 1991; Van Huissteden et al., 2005; Terentieva et al., 2019], а в заболоченных лесах $-0.7 - 17.1 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ [Moore and Knowles, 1990; Ambus and Christensen, 1995; Aronson et al., 2012; Koskinen et al., 2016; Glagolev et al., 2018]. Эти величины сопоставимы, а при определенных условиях (сочетание влажности и температуры почвы) превышают наблюдаемые в болотах [Gullledge and Schimel, 2000; Vasconcelos et al., 2004; Ullah and Moore, 2011; Shoemaker et al., 2014; Christiansen et al., 2017; Torga et al., 2017; Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018].

Таким образом, даже несмотря на высокую пространственно-временную изменчивость потоков метана и диоксида углерода из СИ, их учет необходим для полноценной инвентаризации углеродного баланса наземных экосистем. Подобные исследования особенно актуальны в контексте современных климатических изменений [Гулев и др., 2008]. Ратификация Россией Парижского соглашения подразумевает не только выполнение обязательств по ограничению выбросов углеродсодержащих газов, но и необходимость формирования национальной отчетности по углеродному балансу. Для этого в 2022 году в России запущен важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», который подразумевает выполнение работ по Федеральной научно-технической программе в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений до 2030 года.

К сожалению, на территории России исследования потоков CH_4 и CO_2 из спорадических источников крайне ограничены (выполнялись разовые измерения без привязки к пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости условий), причем проводились они в основном на территории Западной Сибири [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentieva et al., 2019] и европейской части России [Кузнецов и Бобкова, 2014; Иванов и др., 2018; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022]. Вообще среднемасштабные (на уровне субъектов РФ) исследования болотных и лесных экосистем на территории России представлены далеко не во всех регионах, хотя вызывают особый интерес в силу возможности сохранения баланса между детальностью оценок и пространственно-

временным охватом [Зацаринная и Волкова, 2011; Гришуткин и др., 2013; Баишева и др., 2015; Ильясов и др., 2019; Сулова, 2019], а инвентаризации, выполненные на территорию всей страны, требуют уточнения на региональном уровне [Вомперский и др., 2005].

Целью нашей работы стала инвентаризация избыточно увлажненных лесов Московской области (как источников CH_4 и CO_2 из почв) путем ГИС-картографирования и наземных измерений. Поскольку согласно одному из распространенных подходов к оценке региональных потоков парниковых газов («простейшая инвентаризация»), для расчетов необходимы (i) продолжительности периодов, в течение которых происходит выделение или потребление парниковых газов; (ii) величины удельных потоков из изучаемых экосистем; (iii) площади распространения данных экосистем, то определение этих величин составляло основные задачи работы.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Типологическая карта заболоченных лесов

Московская область располагается в центральной части Восточно-Европейской равнины в подзоне южной тайги. Здесь распространены хвойно-широколиственные и широколиственные леса. С севера-запада на юго-восток залесенность территории снижается, значительная часть области покрыта смешанными лесами. Основными породами являются ель обыкновенная (*Picea abies*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), клен остролистный (*Acer platanoides*), вяз гладкий (*Ulmus laevis*) и вяз шершавый (*Ulmus glabra*). В заболоченных местностях распространены ольха черная (*Alnus glutinosa*), черемуха (*Prunus padus*) и ива козья (*Salix caprea*) [Огуреева и др., 1996].

Основой для карты заболоченных лесов Московского региона (здесь и далее под этим термином мы подразумеваем общую территорию г. Москвы и Московской области) стала мозаика из 6 снимков спутника Landsat-8, которые были получены в 2021 году: два снимка – 8 июля (координаты в системе навигации Global Visualization Viewer WRS-2 path/raw: 176/21, 176/22), два – 6 июля (178/21, 178/22) и по одному – 10 мая (179/21) и 18 июня (180/21). Мозаика из полученных снимков покрывает всю территорию Московской области. Конвертация исходных данных производилась в программе Grass 7.6 (GRASS Development Team, США) поканально. Для преобразования значений пикселей, представленных в условных относительных единицах (DN – Digital Numbers), в реальные значения приходящего на сенсор спутника излучения использовалась радиометрическая калибровка при помощи модуля `i.landsat.toar` программы Grass 7.6. Атмосферная коррекция снимков была выполнена на основе модели 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) обратного излучения солнечной радиации от объекта к съемочной аппаратуре [Vermote et al., 2006] при помощи модуля `i.atcorr`, программы Grass 7.6. После получения результатов атмосферной коррекции и объединения 7 каналов каждого снимка в программе QGIS 3.16.5 (QGIS Development Team, США) из 6 снимков была получена мозаика в программе Saga Gis 2.3.2 (SAGA Development Team, Германия).

Процесс дешифрирования был проведен по алгоритму классификации с обучением (Supervised Classification) в программе Multispec (Purdue Research Foundation, США). При задании эталонных полигонов соблюдены следующие условия [Terent'eva et al., 2017]:

- 1) максимальная гомогенность, спектральные неоднородности недопустимы;
- 2) площадь ≥ 6 пикселей;
- 3) определение типа ландшафтов на основе спектральных данных, использование снимков сверхвысокого разрешения и вспомогательных данных в качестве справочной информации (положение в рельефе, структура и текстура [Усова, 2009]).

После того, как не менее 7 эталонных полигонов были включены в каждый дешифровочный класс, запускали модуль автоматической классификации, который классифицировал всю территорию мозаики по методу максимального подобия. Далее дешифровочные классы были объединены в типологические: «лес» (автоморфные леса), «водные поверхности» (реки, озера, иные водные объекты), «заболоченный лес» (избыточно

увлажненные леса с УПГВ, близким или находящимся на поверхности почвы), «слабо заболоченный лес» (избыточно увлажненные леса с УПГВ ниже поверхности почвы). Кроме того, города и поселения, дороги, пашни и др. объекты, не представляющие интерес как объекты классификации в рамках текущей работы, были объединены в класс «другое». Заключительным этапом формирования карты заболоченных лесов стала генерализация и ликвидация шумов с помощью модуля «отсеивание» (QGIS 3.16.5; порог отсеивания 10 пикселей) и отсечение по «внешним» границам Московской области.

Оценка точности проведенной классификации была осуществлена при помощи матрицы ошибок [Stehman, 2004; Sari et al., 2021]. Для этого на полученной карте первый оператор (далее – «пользователь») вручную отметил по 75 точек внутри границ каждого класса («расчётный класс»). Точки были созданы в виде векторного слоя в программе QGIS 3.16.5 и для них автоматически были получены координаты: долгота и широта. Таким образом, пользователь обладал следующим набором данных: географические координаты для 75 точек внутри каждого расчетного класса и их принадлежность к тому или иному расчетному классу, которая выражалась цифровым кодом. Затем графа принадлежности каждой точки к тому или иному классу была скрыта, координаты точек случайным образом отсортированы и переданы второму оператору («производитель»). Таким образом, производитель не знал, к какому расчетному классу на карте относится та или иная точка. Его задача состояла в том, чтобы «вслепую» (то есть, не просматривая созданную карту) присвоить каждой точке код одного из классов, основываясь на проверочном источнике данных («реальный класс»). Это было осуществлено путем просмотра метоположения, соответствующего каждой точке на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения (Google Earth). После того, как производитель «вслепую» отнес все точки к тому или иному классу на карте, он передавал их обратно пользователю, который теперь обладал: географическими координатами точек, кодом класса, который для этих точек был представлен на созданной карте, и кодом класса, который для этих точек был представлен на карте сверхвысокого разрешения (по мнению производителя). Далее проводился расчет общей точности классификации (A):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^M E_i}{\sum_{i=1}^M R_i},$$

где E_i – число точек, чей расчетный и реальный классы совпадают (элементы главной диагонали матрицы ошибок); M – число классов; R_i – общее число проверочных точек (375; табл. 1). Общая точность классификации (A) отражает вероятность того, что результат классификации совпадает с проверочной информацией. Для каждого расчетного класса (i) также оценивалась точность производителя (producer's accuracy, PA_i):

$$PA_i = E_i / C_i,$$

где C_i – суммарное число точек того или иного расчетного класса, попавших в реальный i -ый класс (сумма элементов строк матрицы). Например, в таблице 1 число точек расчетного класса «Лес» (45), к отнесенным производителем в реальный класс «Лес» (79) составляет $45/79 = 0.57$. Точность производителя показывает долю точек на расчетной карте, совпавших с проверочными данными. Аналогично оценивалась точность пользователя (user's accuracy, UA_i):

$$UA_i = E_i / PR_i,$$

где PR_i – число проверочных точек для каждого расчетного класса (75; сумма элементов столбцов матрицы). Точность пользователя показывает долю точек проверочных данных, совпавших с картой.

Измерения потоков CH_4 и CO_2 в заболоченных лесах

Измерения потоков диоксида углерода и метана были осуществлены с 2019 по 2022 годы в смешанном черноольховом (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) влажнотравном лесу «Дорохово» с *Picea abies* (L.) H. Karst., *Betula pubescens* Ehrh., в меньшей степени с *Populus tremula* L., *Tilia cordata* Mill. и *A. incana* (L.) Moench, расположенном в 66 км к западу от границы г. Москвы. Всего было проведено 12 полевых кампаний: 5–24 августа 2019 года (лето); 5–25 июля, 24–25 октября 2020 года (осень); 8–9 марта («зима» – температура воздуха достигала -16°C), 3–4 мая (весна), 10–11 и 29–30 августа (лето), 9–10 октября (осень), 6 ноября (осень) 2021 года; 9 января (зима), 26 февраля (зима) и 2 мая (весна) 2022 года. Растительный покров представлен *Picea abies* (L.) H. Karst., *Betula pubescens* Ehrh., в меньшей степени с *Populus tremula* L., *Tilia cordata* Mill. и *A. Incana* (L.) Moench. Заболоченный лес расположен на склоне с максимальной абсолютной высотой около 230 м н.у.м. и перепадом высот 5–10 м/100 м. Верхняя часть склона дренирована и занята смешанным лесом. Нижняя часть склона (абсолютная высота которой около 220 м н.у.м.) примыкает к выровненной заболоченной поверхности, которая практически лишена древесной растительности и характеризуется круглогодичным стоянием воды выше поверхности почвы. Весьма вероятно, что этому способствуют окружающие склоны, выполняющие роль дополнительного водосбора.

Потоки метана и диоксида углерода измерены при помощи статического камерного метода [Hutchinson and Mosier, 1981; Terent'eva et al., 2017]. Измерения проводили в 2–4 кратной временной повторности днем в период с 11 до 17 часов по местному времени. Время экспозиции камер при отборе проб метана составляло: 9 – 20 минут при уровне почвенно-грунтовых вод (УПГВ) выше поверхности почвы; 20 – 45 минут при УПГВ от поверхности почвы до 15 – 25 см ниже нее; 45 – 60 минут при УПГВ ниже 25 см под поверхностью почвы. Время экспозиции при отборе проб диоксида углерода варьировало в зависимости от сезона: 6 – 9 минут летом и весной 15 – 20 минут осенью, и 60 минут зимой. Пробы газа из камер отбирали в медицинские шприцы объемом 12 и 20 мл в случае метана и диоксида углерода соответственно и закупоривали резиновой пробкой. Концентрацию метана (с 2019 г. до октября 2020 г.) в пробах определяли при помощи модифицированного хроматографа ХПМ-4 («Хроматограф», СССР), оснащенного пламенно-ионизационным детектором. Диаметр колонки – 2.5 мм; длина – 1 м; температура – 30°C ; сорбент – «Совпол», 80–100 mesh; газ-носитель – водород, скорость потока – 5 мл/мин. С октября 2020 г. концентрацию CH_4 определяли на модифицированном хроматографе Автохром («Манометр», Россия), с идентичными характеристиками колонки, газа-носителя и скорости потока. Используемый сорбент – «Полисорб» (80–100 mesh). Для калибровки в обоих случаях использовали смесь воздуха и метана с итоговой концентрацией CH_4 5.00 ± 0.01 ppm (National Institute for Environmental Studies, Япония) при допущении, что регрессионная прямая пересекала ось ординат калибровочного графика (в координатах мВ–ppm) на значении 13 мВ. Объем вводимой пробы – 1.5 мл. Концентрацию метана в каждом шприце оценивали в 3–4 повторностях.

Концентрацию диоксида углерода в отобранных из камер пробах определяли не позднее, чем через 10 часов. Для анализа использовался инфракрасный газоанализатор EGM-4 (PP Systems, США). Отобранные пробы из шприцев последовательно вводили в газоанализатор (суммарный объем кюветы EGM-4 и шлангов для ввода не превышал 7 мл) при выключенном насосе в единичной повторности: объем вводимой пробы составлял 20 мл, что обеспечивало многократную промывку кюветы. Заявленная производителем погрешность измерения составляет $<1\%$ от диапазона измеряемых концентраций, что составляет менее 10 – 20 ppm для наших исследований (диапазоны концентраций 0 – 1000, 0 – 2000 ppm).

Удельные потоки метана и диоксида углерода были рассчитаны при помощи линейной регрессии в случае эмиссии и нелинейной (экспоненциальной) регрессии при потреблении, в координатах концентрация газа (в объеме камеры) – время [Kahaner et al., 1989; Sabrekov et al., 2016; Глаголев и др., 2017]. Поскольку при измерениях использовались непрозрачные камеры, то везде в данной статье «поток CO_2 » отражает суммарное дыхание почвенно-травяно-мохового покрова.

Инвентаризация потоков CH_4 и CO_2 в заболоченных лесах

Расчет годового потока метана и диоксида углерода из заболоченных лесов Московского региона был выполнен посезонно методом простейшей инвентаризации (ранее использовался термин «метод стандартной модели») [Глаголев, 2008; 2010] на основе уравнения:

$$E = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times f_i \times T_j)$$

где A_{ij} – площадь (м^2), занимаемая i -м типом почв в j -ой области; f_i – поверхностная плотность потока ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), характерная для i -го типа почв; T_j – продолжительность периода эмиссии (час), характерная для j -ой области. Продолжительность периода эмиссии метана в рамках отдельных сезонов была принята на основе гидротермических коэффициентов и радиационного индекса следующим образом: лето – 122 дня (с июня по сентябрь включительно), осень – 76 дней (с октября до середины декабря), зима – 90 дней (с середины декабря до середины марта), весна – 77 дней (с середины марта до конца мая). Поверхностная плотность потока была рассчитана как медиана (а также 1Q, 3Q) за рассматриваемый сезон на основе всех наблюдений. При расчете годового потока мы пренебрегли суточной динамикой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Карта заболоченных лесов Московского региона

Полученная карта заболоченных лесов Московского региона представлена на рисунке 1 и характеризуется следующими площадями типологических классов: «лес» – 2 157 716 га, «водные поверхности» 45 693 – га, «заболоченный лес» – 58 384 га, «слабо заболоченный лес» – 233 865 га.

Таким образом, суммарная доля лесных экосистем, которые способны функционировать как источники метана – заболоченные леса и слабо заболоченные леса – составляет 1.2 и 5.0% площади региона соответственно или 292 249 га. Согласно карте, заболоченные леса – это преимущественно небольшие экосистемы (от мелких – площадью 3 – 5 га, которые распространены крайне широко, до более крупных – площадью 30 – 50 га, встречающихся несколько реже), которые испытывают избыточное увлажнение в результате расположения по окраинам болотных массивов, поблизости от речных пойм, в мелких локальных понижениях рельефа, а также в элементах овражно-балочной сети (преимущественно в южной части Московской области). Слабо заболоченные леса расположены на более дренированных участках, они часто связаны с заболоченными лесами в единые ландшафтные структуры, однако распространены значительно шире, и занимают существенно большие площади: от 10 – 50 до 100 – 500 га.

Заболоченные и слабо заболоченные леса, согласно полученной карте, являются «спутниками» распространения болотных экосистем и расположены в Московской области неравномерно: крупные площади обнаружены в северной (Дмитровский район) и восточной частях (Шатурский район) региона (рисунок 1а). Кроме того, заболоченные и слабо заболоченные леса часто представлены как избыточно увлажненные участки близ автоморфных лесов: площадь таких экосистем незначительна и редко превышает 10 га (рисунок 1б). Предположительно, основной причиной такого локального заболачивания являются особенности микрорельефа (как и в случае заболоченного леса «Дорохово», где были проведены измерения потоков парниковых газов), и подтопление в местах формирования ручьев и более мелких водотоков.

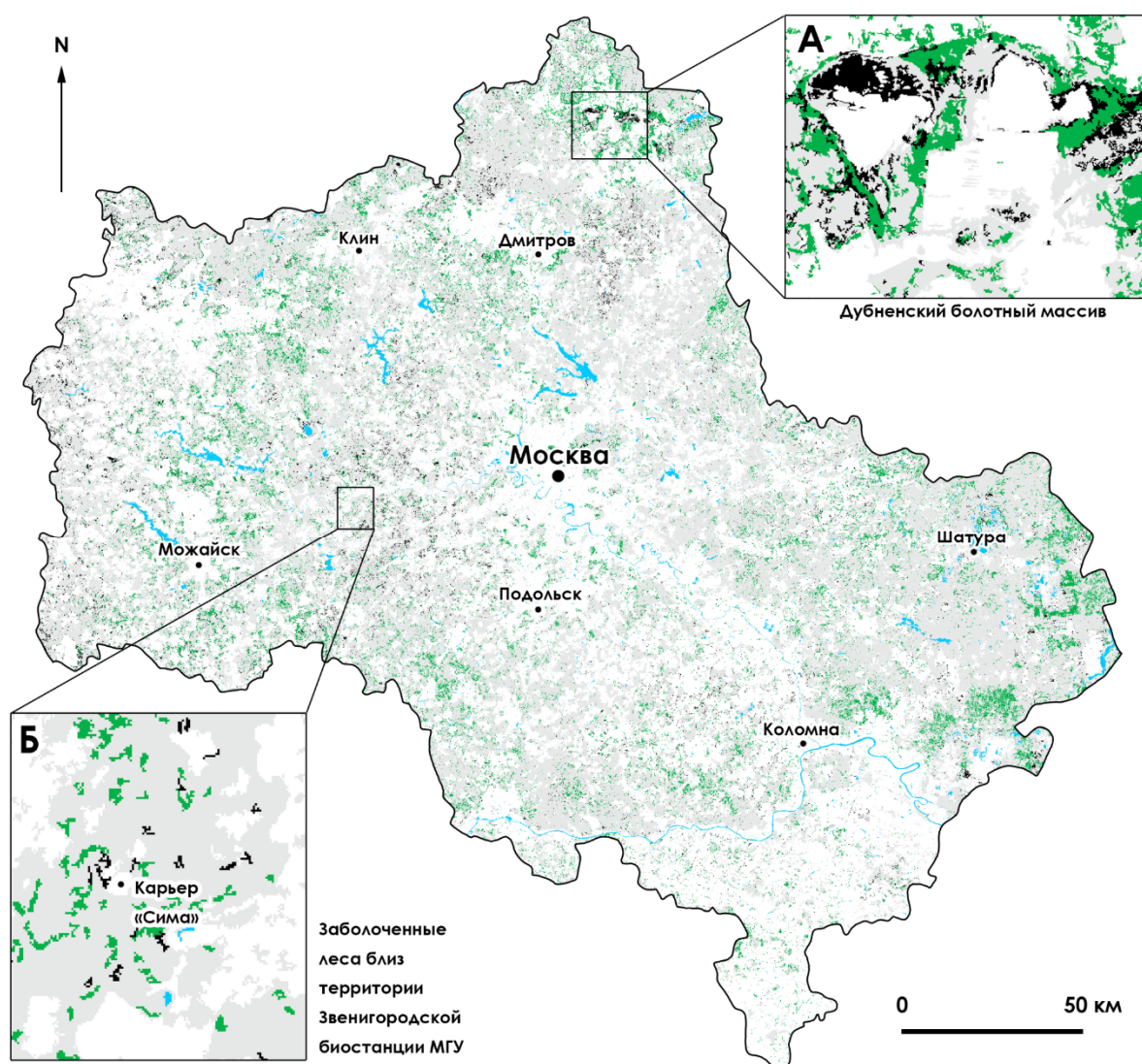


Рисунок 1. Карта заболоченных (черный) и слабо заболоченных (зеленый) лесов Московского региона. Серым показаны лесные массивы, голубым – водные поверхности, белым – города и поселения, дороги, пашни и др. объекты.

Таблица 1. Матрица ошибок и точность классов для результатов классификации

		Расчетные классы					C_i	Точность производителя (PA_i)	
		Лес	Водные поверхности	Заболоченный лес	Слабо заболоченный лес	Прочее			
Реальные классы	Лес	45	1	16	16	1	79	0.57	
	Водные поверхности	0	70	0	0	0	70	1.00	
	Заболоченный лес	10	0	27	19	3	59	0.46	0.74
	Слабо заболоченный лес	20	0	22	30	1	73	0.41	
	Прочее	0	4	10	10	70	94	0.74	
	PR_i	75	75	75	75	75	375		
Точность пользователя (UA_i)		0.60	0.93	0.36	0.40	0.93			
				0.65					

Матрица ошибок полученной карты представлена в табл. 1. Общая точность классификации (отношение суммы элементов главной диагонали матрицы ошибок к сумме

проверочных точек по классам) составляет 76 %. Ранжирование классов по показателям точности производителя и точности пользователя убывает в ряду: «водные поверхности», «прочее», «лес», «слабо заболоченный лес», «заболоченный лес». Наиболее точно классифицируются водные поверхности с максимально возможной точностью производителя (100%). Класс «прочее» имеет такую же точность пользователя, как и водные поверхности (93%), но несколько меньшую точность производителя (74%). В целом наименее точно определены классы заболоченных и слабо-заболоченных лесов (36 – 46%): они имеют значительные пересечения со всеми классами кроме открытой водной поверхности, и, что наиболее важно, наибольшие – между собой.

Основываясь на полученных результатах оценки точности карты, можно заключить, что заболоченные и слабо заболоченные леса – это экосистемы, которые достаточно трудно различить между собой, основываясь на дистанционных данных единичных (во времени) спутниковых снимков и использовании классификации с обучением. Для достижения разумной точности классификации и при дальнейших расчетах регионального потока мы объединили два класса: «заболоченный лес» и «слабо заболоченный лес» в один: при этом точность пользователя объединенного класса составила 65%, а точность производителя – 74%, что позволяет достаточно точно предсказывать местоположение лесов разной степени заболоченности при их совместном рассмотрении.

Потоки CH_4 и CO_2 и их инвентаризация

Обобщенные результаты измерений потоков метана и диоксида углерода по сезонам и их краткие статистические характеристики представлены в табл. 2. Медианы потоков метана возрастали в ряду: зима – лето – весна – осень, потоков диоксида углерода – в ряду зима – осень – весна – лето. Единственным сезоном года, когда эмиссия метана вероятнее всего не прекращалась, является весна – первый квартиль величины потоков CH_4 в это время был больше нуля. Летом и осенью эмиссия метана из почв заболоченных лесов достигала $2.0 - 2.6 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, что сопоставимо с болотными экосистемами. Потоки диоксида углерода в заболоченных лесах в целом слабо отличаются от величин, характерных для почв лесных экосистем, а относительная величина сезонной амплитуды сопоставима с таковой для метана в течение года. В целом полученные результаты оценки потоков в заболоченных лесах близки в сравнении с имеющимися литературными данными [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentieva et al., 2019; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022].

Инвентаризация², выполненная на основе предложенного подхода, позволяет оценить поток метана из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения в $6\,666 \text{ тС год}^{-1}$ (1Q – 407; 3Q – 38 790); диоксида углерода в 1.5 МтС год^{-1} (1Q – 0.6; 3Q – 2.7). С учетом столетнего потенциала глобального потепления для метана, равного 28 [Drösler et al., 2014], суммарная эмиссия метана и диоксида углерода из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения составит $5.7 \text{ МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$ (1Q – 2.2; 3Q – 11.4). В табл. 3 представлена более подробная информация, полученная на основе простейшей инвентаризации.

² В качестве примера расчетов потока метана за сезон рассмотрим летний период: медиана потока метана летом ($0.14 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$) была умножена на произведение количества часов в сутках и продолжительность сезона ($24 \times 122 = 2928 \text{ ч}$; $2928 \times 0.14 = 415.8 \text{ мгС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$), затем на площадь заболоченных лесов ($415.8 \times 2.922 \times 10^9 \text{ м}^2 = 1\,215 \times 10^9 \text{ мгС год}^{-1}$), и, наконец, на поправочный коэффициент (10^{-9}) для перевода мгС в тС. Расчеты для других сезонов были выполнены также и результаты суммированы. Суммарный за год поток диоксида углерода рассчитывали аналогичным образом (отличие заключалось в величине поправочного коэффициента, который составил 10^{-15} для перевода мгС в МтС). При пересчете потока CH_4 (выраженного в тС год^{-1}) в $\text{МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$, исходную величину умножали на 16/12 (отношение молярной массы CH_4 к молярной массе С), затем на 28 (100-летний потенциал глобального потепления) и, наконец, на поправочный коэффициент (10^{-6}) для перевода тонн в мегатонны. Для расчета суммарного потока, состоящего из эмиссии CH_4 ($\text{МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$) и CO_2 (МтС год^{-1}), последнюю умножали на 44/12 (отношение молярной массы CO_2 к молярной массе С) и складывали.

Таблица 2. Статистические характеристики потоков метана и диоксида углерода по сезонам

	CH ₄ , мгС м ⁻² ч ⁻¹				CO ₂ , мгС м ⁻² ч ⁻¹			
	Медиана	1 квартиль (1Q)	3 квартиль (3Q)	n	Медиана	1 квартиль (1Q)	3 квартиль (3Q)	n
Лето	0.14	0.00	2.61	251	132	51	237	189
Осень	0.74	0.00	2.03	84	26	9	72	22
Зима	0.02	0.00	0.13	64	5	2	6	5
Весна	0.25	0.07	0.89	64	32	17	49	56

Подавляющую роль в общей величине выбросов (МтСО₂-экв год⁻¹) диоксида углерода и метана в течение года играет летний период (74% годовой эмиссии); осенний и весенний вносят сопоставимый вклад, составляющий в сумме около 24% годовой эмиссии; наконец, зимой эмиссия СО₂ и СН₄ из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения не превышает 2% от годовой. Несмотря на то, что эмиссия метана вносит относительно небольшой вклад в суммарные за год выбросы парниковых газов, в отдельные сезоны учет СН₄ играет более ощутимую роль: например, осенью доля СН₄ составляет почти треть выбросов от суммы СН₄ и СО₂, зимой и весной около 10%. С учетом того, что почвы рассмотренных нами заболоченных лесов выбрасывают сопоставимое с автоморфными лесами количество диоксида углерода, недооцененным источником можно считать лишь эмиссию метана. Как было отмечено выше, верхняя граница оценки эмиссии метана составила до 38.8 тыс. тС в год соответственно, что может быть весьма ощутимо в масштабах Московского региона.

Таблица 3. Инвентаризация потока метана и диоксида углерода по сезонам на территории Московского региона из заболоченных и слабо заболоченных лесов

	CH ₄ , тС год ⁻¹	CH ₄ , МтСО ₂ -экв год ⁻¹	CO ₂ , МтСО ₂ год ⁻¹	CH ₄ +CO ₂ МтСО ₂ -экв год ⁻¹
	Медиана / 1Q / 3Q			
Лето	1 215 / 1 / 22 347	0.05 / 0.00 / 0.83	4.15 / 1.59 / 7.43	4.19 / 1.59 / 8.26
Осень	3 945 / 19 / 10 834	0.15 / 0.00 / 0.40	0.51 / 0.18 / 1.40	0.66 / 0.18 / 1.80
Зима	147 / 17 / 808	0.01 / 0.00 / 0.03	0.12 / 0.04 / 0.13	0.13 / 0.05 / 0.16
Весна	1 359 / 370 / 4 802	0.05 / 0.01 / 0.18	0.63 / 0.35 / 0.97	0.68 / 0.36 / 1.15
Сумма	6 666 / 407 / 38 790	0.25 / 0.02 / 1.45	5.40 / 2.16 / 9.92	5.65 / 2.17 / 11.37

ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение заболоченных лесов различной степени увлажнения

В наибольшей степени лесные экосистемы всех типов увлажнения (от автоморфных до переходных и гидроморфных), распространены к северо-западу и юго-востоку от Москвы, в области Ламско-Дубненской и Мещерской низменностей, соответственно. Также, большая облесенность земель наблюдается к югу от Москвы, в границах Московской равнины в области рек Лопасня и Ока. Такое расположение лесных массивов определяется особым гидрофизическим режимом и местом в ландшафте (в понижениях происходит накопление влаги и формируются особые температурные условия). Спутниками автоморфных лесных массивов, вероятно, являются многочисленные мелкие заболоченные и слабо заболоченные участки: весьма вероятно, что с учетом среднего пространственного разрешения полученной карты (30 м) некоторые из них (находящиеся на границе генерализации в 10 пикселей) могут быть артефактом классификации и формировать значительную долю погрешности, полученную при расчете матрицы ошибок. Мы предполагаем, что такие экосистемы, скорее всего, являются непостоянными источниками метана, зависящими от количества выпадающих осадков. Более крупные по площади заболоченные леса постоянного избыточного увлажнения приурочены к понижениям рельефа, а также к участкам, расположенным близ болотных экосистем. Кроме того, достаточно большие по площади, заболоченные и слабо заболоченные леса распространены «пятнами» в массивах автоморфных лесов на юго-западе Московской области. Там, где, согласно карте, находятся большие площади, занятые заболоченными лесами, рядом расположены и слабо заболоченные леса. При увеличении степени увлажнения

от более высоких участков рельефа к более низким, наблюдается ряд: лес, слабо заболоченный лес, заболоченный лес, болото (рис. 1а).

Согласно данным Большой Российской энциклопедии [Осипов и др., 2004] площадь автоморфных лесов на территории Московской области в 2015 году составила 1 896 000 га, и с этой оценкой достаточно хорошо согласуются данные, полученные на основе текущей классификации (2 157 716 га). На юго-востоке Московской области высокая залесенность территорий отмечается только к северу от реки Оки, далее, в окрестностях г. Зарайск и реки Осётр начинается Заокское эрозионное плато, представляющее собой пологоволнистую равнину с развитой овражно-балочной сетью. Леса здесь занимают не более 5 – 7% площади, а сама территория подвержена эрозионным процессам [Барталев, 2006]. Вероятно, лишь незначительная доля этих лесов переувлажнены (в частности, те из них, что согласно созданной карте расположены в наиболее глубоких балках и оврагах) и являются источниками CH_4 .

В целом, вне зависимости от занимаемой площади, заболоченные и слабо заболоченные леса приурочены к тем или иным понижениям рельефа разного размера и происхождения. Интересно, что в области Мещерской низменности крупных рек нет, но отмечается наличие большого количества озер: Карасово, Святое, Великое, Дубовое. Понижение в рельефе здесь также играет роль фактора скопления влаги, в том числе способствующего распространению заболоченных и слабо заболоченных лесов по окраинам водных объектов.

Результаты ГИС-картографирования в значительной степени совпадают с другими оценками по характеру распространения лесных массивов различной степени увлажнения. Например, аналогично карте растительности СССР [Карта растительности СССР] на севере от г. Москвы в районе г. Александров расположены небольшие по площади территории заболоченных лесов, тогда как на востоке в районе Мещерской низменности на обоих картах выделяются большие массивы лесов и территорий, подвергнутых периодическому переувлажнению. На карте растительности СССР места заболачивания приурочены к сосновым и дубовым лесам (дуб черешчатый, без граба), в то время в рамках текущей работы при наземных обследованиях чаще в переувлажненных местообитаниях встречались заболоченные широколиственные и смешанные леса с преобладанием ольхи, ели и березы. Такой тип леса на карте СССР выделяется на западе Московской области (на юге доходит до р. Ока, на севере плавно сменяется хвойным типом в районе р. Волга), однако, обозначения степени заболачиваемости земель отсутствуют. Также существуют сходства в расположении заболоченных местностей при сравнении с картой GLWD [Global...]: например, на востоке Московской области здесь распространены пресноводные болота в области пойменных равнин, в то время как на созданной карте – слабо заболоченные и заболоченные леса. К сожалению, подобных сходств между картами не наблюдается в других районах области, кроме расположения рек и озер, а также водных резервуаров. Весьма вероятно, что это связано с достаточно низким пространственным разрешением карты GLWD и относительно небольшой площадью, занимаемой отдельными заболоченными лесами.

Крайне важно сравнение полученных результатов с широко известной картой растительности Московской области [Огуреева и др., 1996]. Заболоченные и слабо заболоченные леса на севере региона (особенно в районе Дубненского болотного массива), соответствуют заболоченным черноольховым, пушистоберезовым лесам и лесам с серой ольхой; в южной они идентичны распространению пушистоберезовых и сосново-еловых-долгомошно-сфагновых лесов по окраинам болот; наконец, слабо заболоченные леса южнее Рузского водохранилища соответствуют еловым лесам с ольхой серой, а к северо-западу от г. Клин – черноольховым и сосново-еловым с черной ольхой на карте Г.Н. Огуреевой и др., [1996].

Также представляет большой интерес карта распространения различных типов лесных экосистем Московской области, выполненная путем анализа данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений [Kotlov and Chernenkova, 2020]. Площадь, занимаемая заболоченными и слабо заболоченными лесами, полученная в нашей работе, сопоставима с распространением лесов с черной и серой ольхой: 5.01 и 1.44% от площади региона [Kotlov and Chernenkova, 2020], что косвенно подтверждает адекватность полученной нами оценки степени заболоченности региона.

К сожалению, количество детальных работ по картографированию заболоченных лесных экосистем крайне ограничено, и будущее направление наших исследований будет состоять в улучшении точности карты заболоченных лесов с учетом результатов предшественников.

Точность классификации карты

Одной из основных проблем ГИС-картографии на основе данных дистанционного зондирования является слабая обеспеченность наземными данными или отсутствие возможности проверки точности классификации полевыми методами из-за широкого охвата изучаемой территории. Тем не менее, точность классификации, достигающая 60-70%, полученная на основе методов, описанных выше, является скорее правилом, чем исключением [Kotlov and Chernenkova, 2020]. Мы предполагаем, что ГИС-картографирование, объединяющее в своей основе несколько картографических источников (например, в качестве медианной оценки с объединением данных текущей работы, а также более ранних карт [Огуреева и др., 1996; Kotlov and Chernenkova, 2020]) позволит улучшить итоговый результат. Кроме того, перспективным направлением является классификация разновременных космических снимков с целью выявления паттерна изменчивости спектральной информации исследуемых объектов во времени как признака дешифрирования; использование нейросетей позволяет оценить не только спектральную информацию данных дистанционного зондирования, но также форму и текстуру объектов, как дополнительных иных дешифровочных признаков [Терентьева и др., 2021].

Отметим также, что основной проблемой увеличения точности полученной карты являются затруднения, возникающие при разделении классов заболоченных и слабо заболоченных лесов. При наземных и экспертных оценках (на основе ДЗЗ сверхвысокого разрешения) явные различия между растительным покровом этих экосистем отсутствовали, хотя эмиссия метана между участками с различной степенью увлажнения может отличаться на порядок. Четкое разграничение данных двух классов может быть достигнуто в будущем при более детальном рассмотрении спектральных признаков и временной изменчивости характеристик их почвенного и растительного покрова.

Инвентаризация потоков CH_4 и CO_2 в заболоченных лесах

Оценка потока метана и диоксида углерода, основанная на измерениях, осуществленных в модельном заболоченном лесу, безусловно, носит предварительный характер. Однако, в условиях практического отсутствия сведений о потоках CH_4 и CO_2 в таких экосистемах Московского региона, данный подход представляется закономерным, но подразумевает расширение географии проводимых исследований в будущем. Отметим, что изменчивость потоков метана в пределах модельного заболоченного леса за 3 года была столь велика, что оказалась сопоставима с таковой в заболоченных лесах в принципе [Runkov, in press]. За все время проведения измерений минимальный достоверно определённый поток метана составил $-0.7 \pm 0.5 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, максимальный – $166 \pm 20 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$; диоксида углерода – 5 ± 20 и $736 \pm 254 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно. Мы предполагаем, что потоки метана и диоксида углерода в других типах леса на территории Московского региона могут отличаться по характеру временной и пространственной изменчивости, однако весьма маловероятно, что в будущем будут получены принципиально (более, чем на порядок) отличающиеся по величине оценки выбросов. В дальнейшем мы продолжим работу и проверим гипотезу о пространственной изменчивости потоков парниковых газов в иных типах заболоченных лесов. Отметим, что для этого, кроме полевых работ, потребуется создание более подробной карты заболоченных лесов Московского региона, что является задачей еще одного самостоятельного исследования.

ВЫВОДЫ

Методом классификации с обучением на основе данных спутниковых снимков Landsat-8 создана карта заболоченных лесов, покрывающих территорию Московского региона (суммарно г. Москвы и Московской области). Суммарная заболоченность составила 6.2% площади региона или 292 249 га соответственно, при общей точности карты 76%. На основе

карты и наземных измерений выполнена простейшая инвентаризация потоков метана и диоксида углерода из почв заболоченных лесов с оценкой их сезонной изменчивости. Подавляющую роль в общей величине выбросов диоксида углерода и метана в течение года (медиана – 5.65 МтСО₂-экв год⁻¹; 1Q – 2.17; 3Q – 11.37) играет летний период (74% годовой эмиссии); осенний и весенний вносят равный вклад, составляющий в сумме около 24% годовой эмиссии; наконец, доля зимней эмиссии СО₂ и СН₄ не превышает 2%. С учетом того, что почвы рассмотренных нами заболоченных лесов выбрасывают сопоставимое с автоморфными лесами количество диоксида углерода, недооцененным источником можно считать лишь эмиссию метана, оцениваемую по верхней границе до 38.8 тыс. тС в год, что может быть весьма ощутимо в масштабах Московского региона. В будущем необходимо продолжить уточнение полученных оценок с учетом: пространственной изменчивости потоков парниковых газов (расширение сети проводимых измерений), временной изменчивости потоков (суточная динамика), осуществить поиск зависимости величины потоков с ключевыми экологическими факторами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2022-169) на организацию новой молодежной лаборатории "Лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири" в Югорском государственном университете в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты». Авторы выражают благодарность студенту факультета почвоведения МГУ Р.А. Рунькову за помощь в проведении полевых и лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baisheva E.Z., Martynenko V.B., Mirkin B.M., Muldashev A.A., Shirokih P.S., Bikbaev I.G. 2015. Bolota Respubliki Bashkortostan kak ob'ekt pervostепенной ohrany. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*. 20(3(79)): 5-13 (in Russian). [Баишева Э.З., Мартыненко В.Б., Миркин Б.М., Мулдашев А.А., Широких П.С., Бикбаев И.Г. 2015. Болота Республики Башкортостан как объект первостепенной охраны // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. Т. 20. №. 3 (79). С. 5-13.].
- Bartalev S.S. 2006. Evaluation of indicators of the state of forests in the Moscow region according to satellite research // *Issledovano v Rossii*, 948 (in Russian). [Барталев С.С. 2006. Оценка индикаторов состояния лесов Московской области по данным спутниковых наблюдений // Исследовано в России. Т. 948].
- Bykov D.L. 2011. *ZhD. PROZAIK*, Moscow, 673 pp. (in Russian). [Быков Д.Л. 2011. ЖД. М.: ПРОЗАИК. с. 673]
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. 2005. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izvesfiya Rossiyskoj Akademii Nauk, Seriya geograficheskaya*, 5: 39-50 (in Russian). [Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. Т. 5. С. 39-50].
- Glagolev M.V. 2008. The emission of methane: ideology and methodology of «standard model» for Western Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, S1: 176-190 (in Russian). [Глаголев М.В. 2008. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. № S1. С. 176-190].
- Glagolev M.V. 2010. *CH₄ emission from bog soils of Western Siberia: from soil profile to region*: dis. cand. biol. sciences. Moscow, 212 pp. (in Russian). [Глаголев М.В. 2010. Эмиссия CH₄ болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дисс. ... канд. биол. наук., М. 212 с.].
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentyeva I.E., Sabrekov A.F., Krasnov O.A., Maksyutov S.S. 2017. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of Western Siberian southern and middle taiga subzones. *Optika Atmosfery i Okeana*, 30(4): 301-309 (in Russian). [Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максютлов Ш.Ш. 2017. Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 30. № 4. С. 301-309].
- Grishutkin O.G., Vargot E.V., Silaeva T.B., Khapugin A.A., Chugunov G.G. 2013. Plant covering of marshes in Mordovia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 8: 28-34 (in Russian). [Гришуткин О.Г., Вагрот Е.В., Силаева Т.Б., Хапугин А.А., Чугунов Г. Г. 2013. Растительный покров болот Мордовии // Вестник Томского государственного педагогического университета. Т. 8. С. 28-34.].

- Gulev S.K., Kattsov V.M., Solomina O.N. 2008. Global warming continues. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 78(1): 20-27 (in Russian). [Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. 2008. Глобальное потепление продолжается // Вестник Российской Академии наук Т. 78. № 1. С. 20-27.].
- Zatsarinna D.V., Volkova E.M. 2011. The ecological features of plant communities of float karst mires in Tula region. *Izvestiya Tula State University Natural Sciences*, 1: 227-236 (in Russian). [Зацаринная Д.В., Волкова Е.М. 2011. Экологические особенности растительных сообществ славинных карстовых болот Тульской области // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. № 1. С. 227-236.].
- Ivanov D.G., Tatarinov F.A., Kurbatova Yu.A. 2018. *Soil respiration in swampy forests of the European part of Russia*. Pochvy v biosphere, 246-250 pp. (in Russian). [Иванов Д.Г., Татаринов Ф.А., Курбатова Ю. А. 2018. Почвенное дыхание в заболоченных лесах европейской части России // Почвы в биосфере. С. 246-250.].
- Ilyasov D.V., Sirin A.A., Makarova L.Y., Bukin A.V., Korablina, N. E. 2019. GIS Mapping of Natural and Human-disturbed Peatlands in the Ryazan Oblast. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotekhnologicheskogo Universiteta im. P.A. Kostycheva*, 1(41) (in Russian). [Ильясов Д.В., Сирин А.А., Макарова Л.Ю., Букин А.В., Кораблина Н.Е. 2019. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно измененных торфяников Рязанской области // Вестник РГАТУ. № 1(41).].
- Vegetation map of the Union of Soviet Socialist Republics. *Acad. sciences of the USSR. Botanical Institute, dep. Geobotany*. URL: <https://elbib.rgo.ru/handle/123456789/234418> (in Russian). [Карта растительности Союза Советских Социалистических Республик / Акад. наук СССР. Ботанический ин-т, отд. Геоботаники URL: <https://elbib.rgo.ru/handle/123456789/234418> (In Russian) (Last accessed 24.05.2023)].
- Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. 2014. Organic carbon fluxes in the system soil-phytocenosis of bilberry-sphagnum spruce forest in the middle taiga zone of the Komi republic. *Russian Journal of Ecology*, 45: 338-344 (in Russian). [Кузнецов М.А., Бобкова К.С. 2014. Потоки органического углерода в системе почва-фитоценоз ельника черничного сфагнового средней тайги Республики Коми // Экология. № 5. С. 338-345.].
- Ogureeva G.N., Miklyaeva I.M., Suslova E.L., Shvergunova L.V. 1996. *Medium-scale (1:200,000) vegetation map of the Moscow region*. Moscow State University M.V. Lomonosov, Moscow (in Russian). [Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Суслова Е.Л., Швергунова Л.В. 1996. Среднемасштабная (1:200 000) карта растительности Московской области. М.: МГУ.].
- Osipov Yu.G., Kravets S.L. 2004. Great Russian Encyclopedia. Moscow, (22) (in Russian). [Осипов Ю.Г., Кравец С.Л. 2004. Большая Российская Энциклопедия. М.: Москва. Т. 22.].
- Suslova E.G. 2019. Forests of Moscow region. *Ecosystems: ecology and dynamics*, 3(1), 119-190 (in Russian). [Суслова Е.Г. 2019. Леса Московской области // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. №1. С. 119-190].
- Terentieva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V. 2021. Mapping waterlogged ecosystems of West Siberia using convolutional neural networks. In *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present*. Publishing house of Tomsk University, Tomsk, pp. 92-94 (in Russian). [Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. 2021. Использование сверточных нейронных сетей для картографирования переувлажненных экосистем западной Сибири // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. С. 92-94.].
- Usova L.E. 2009. *A practical guide to landscape interpretation of aerial photographs of various types of wetlands in Western Siberia*. Nestor-Istoriya, Saint-Petersburg (in Russian). [Усова Л.И. 2009. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. Спб.: Нестор-История.].
- Ambus P., Christensen S. 1995. Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-, grassland-, and agroecosystems. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*, 24(5): 993-1001.
- Aronson E.L., Vann D.R., Helliker B.R. 2012. Methane flux response to nitrogen amendment in an upland pine forest soil and riparian zone. *J. Geophys. Res.* 117(G3).
- Christiansen J.R., Levy-Booth D., Prescott C.E., Grayston S.J. 2017. Different soil moisture control of net methane oxidation and production in organic upland and wet forest soils of the Pacific coastal rainforest in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(5): 628-635.
- Davydov D.K., Dyachkova A.V., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for longterm measurements CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(1): 5-14.
- Drösler M., Verchot L.V., Freibauer A., Pan G., Evans C.D., Borbonniere R.A., Alm J.P., Page S., Agus F., Hergoualc'h K., Couwenberg J., Jauhainen J., Sabilam S., Wang C. 2014. Drained inland organic soils (Chapter 2). In *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*, (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler, eds.).
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Mochenov S.Yu., Maksutov S.S. 2018. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of south and middle taiga of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (138): 012005.
- Global lakes and wetlands database URL: <https://www.worldwildlife.org/pages/global-lakes-and-wetlands-database> (Last accessed 24.05.2023).
- Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E., Golovchenko A.V. 2021. Soil respiration in alder swamp in southern taiga of European Russia depending on microrelief. *Forests*. 12(4): 496. <https://doi.org/10.3390/f12040496>
- Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E., Suvorov G.G., Golovchenko A.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L. 2022. Spatio-Temporal Variability of Methane Fluxes in Boreo-Nemoral Alder Swamp (European Russia). *Forests*, 13(8): 1178.
- Gulledge J., Schimel J.P. 2000. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems*, 3(3): 269-282.

- Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Guillén Bolaños T., Bindi M., Brown S., Camilloni I. A., Diedhiou A., Djalante R., Ebi K., Engelbrecht F., Guiot J., Hijikata Y., Mehrotra S., Hope C.W., Payne A. J., Pörtner H.-O., Seneviratne S.I., Thomas A., Warren R., Zhou G. 2019. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5 C. *Science*, 365(6459).
- Hutchinson G.L., Mosier A.R. 1981. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2): 311-316.
- Kahaner D., Moler C., Nash S. 1989. *Numerical methods and software*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ., 495 pp.
- Kelly C.A., Chynoweth D.P. 1981. The contributions of temperature and of the input of organic matter in controlling rates of sediment methanogenesis. *Limnology and Oceanography*, 26(5): 891-897.
- Koskinen M., Maanavilja L.M., Nieminen M., Minkkinen K., Tuittila E.S. 2016. High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. *Mires and Peat*, 17(02).
- Kotlov I., Chernenkova T. 2020. Modeling of Forest Communities' Spatial Structure at the Regional Level through Remote Sensing and Field Sampling: Constraints and Solutions. *Forests*, 11(10): 1088.
- Matthews E., Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global biogeochemical cycles*, 1: 61-86.
- Megonigal J.P., Hines M.E., Visscher P.T. 2004. Anaerobic metabolism: Linkages to trace gases and aerobic processes. *Biogeochemistry*, 8(10): 317-424.
- Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M., Mander Ü., Zhang L., Anderso C.J., Jørgensen S.E., Brix H. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28: 583-597.
- Mochenov S.Yu., Churkina A.I., Sabrekov S.F., Glagolev M.V., Il'yasov D.V., Terentieva I.E., Maksyutov S.S. 2018. Soils in seasonally flooded forests as methane sources: A case study of West Siberian South taiga. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138: 012012.
- Moore T.R., Knowles R. 1990. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry*, 11(1): 45-61.
- Moore P.D. 2002. The future of cool temperate bogs. *Environmental conservation*, 29(1): 3-20.
- Runkov R.A. Spatial variability of methane emissions from soils of wet forests: a brief review. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, (in press).
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Alekseychik P.K., Smolentsev B.A., Terentieva I.E., Krivenok L.A., Maksyutov S.S. 2016. A process-based model of methane consumption by upland soils. *Environmental Research Letters*, 11(7): 075001.
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. 2013. Methane Emission from Mires of the West Siberian Taiga. *Eurasian Soil Science*, 46(12): 1182-1193.
- Sari I.L., Weston C.J., Newnham G.J., Volkova L. 2021. Estimating land cover map accuracy and area uncertainty using a confusion matrix: A case study in Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 914(1): 012025.
- Shoemaker J.K., Keenan T.F., Hollinger D.Y., Richardson A.D. 2014. Forest ecosystem changes from annual methane source to sink depending on late summer water balance. *Geophysical Research Letters*, 41(2): 673-679.
- Stehman, S.V. 2004. A critical evaluation of the normalized error matrix in map accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6): 743-751.
- Taylor K.E., Penner J.E. 1994. Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases. *Nature*, 369(6483): 734-737.
- Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S. 2017. A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide. *Water resources*, 44(2): 297-307.
- Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Ilyasov D.V., Ebrahimi A., Glagolev M.V., Maksyutov S.S. 2019. Highly dynamic methane emission from the West Siberian boreal floodplains. *Wetlands*, 39(2): 217-226.
- Torga R., Mander U., Soosaar K., Kupper P., Tullus A., Rosenvall K., Ostonen I., Kutti S., Jaagus J., Sober J., Maddison M., Kaasik A., Lohmus K. 2017. Weather extremes and tree species shape soil greenhouse gas fluxes in an experimental fast-growing deciduous forest of air humidity manipulation. *Ecological Engineering*, 106: 369-377.
- Ullah S., Moore T.R. 2011. Biogeochemical controls on methane, nitrous oxide, and carbon dioxide fluxes from deciduous forest soils in eastern Canada. *J. Geophys. Res.*, 116: G03010.
- Van Huissteden J., Maximov T.C., Dolman A.J. 2005. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 110(G2): 06956.
- Vasconcelos S.S., Zarin D.J., Capanu M., Littell R., Davidson E.A., Ishida F.Y., Santos E.B., Araújo M.M., Aragão D.V., Rangel-Vasconcelos L.G.T., de Assis Oliveira F., McDowell W.H., de Carvalho C.J.R. 2004. Moisture and substrate availability constrain soil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB2009. <https://doi.org/10.1029/2003GB002210>
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J. J., Kotchenova S.Y. 2006. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV). *6S User Guide Version*, 3(2): 1-55.
- Whalen S.C., Reeburgh W.S., Kizer K.S. 1991. Methane consumption and emission by taiga. *Global Biogeochemical Cycles*, 5(3): 261-273.

Поступила в редакцию: 07.04.2023
Переработанный вариант: 24.05.2023