УДК 552.578

МЕТАН В ПОЧВАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2018 г. Дмитрий Н. Гарькуша^{1,*}, Юрий А. Фёдоров¹, Наталья С. Тамбиева²

¹Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия

²ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: gardim1@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.08.2017 г.

Аннотация. Авторами обобщены и проанализированы экспериментальные данные по распределению содержания метана в почвах нижнедонской степной провинции (юг Ростовской области) и подзоны типичной (средней) тайги (Карелия), лесоболотных ландшафтов Архангельской, Псковской и Московской областей. Также привлечены данные литературных источников. Исследования показали, что в дренированных почвах тундры, таежно-лесной и степной зон, а также переходных зон между лесом и степью выявлены относительно невысокие концентрации метана (в среднем 0.18 мкг/г пробы), с тенденцией увеличения его количества от степи к тайге, по мере возрастания влажности почв. Более высокие концентрации метана (на 1–2 порядка выше) характерны для почв переувлажненных участков и торфяных залежей болот. Распределение по вертикальному профилю метана в сухих и временно затопляемых почвах характеризуется уменьшением его концентраций от поверхности к нижним горизонтам, в то время как в торфяных залежах болот концентрация газа, напротив, значительно возрастает с глубиной.

Ключевые слова: метан, концентрация, переувлажненные и дренированные почвы, тундра, тайга, степь, торфяные залежи, вертикальное распределение.

DOI: 10.7868/S2587556618030068

METHANE IN SOILS OF EUROPEAN RUSSIA

Dmitry N. Gar'kusha^{1,*}, Yury A. Fedorov¹, and Natalia S. Tambieva²

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

*E-mail: gardim1@yandex.ru

Received August 18, 2017

Abstract. The authors compiled and analyzed experimental data on the distribution of methane content in the soils of the lower Don steppe province (the south of Rostov oblast) and the subzone of typical (average) taiga (Karelia), forest-bog landscapes of Arkhangelsk, Pskov and Moscow oblasts. The data from the literature were also involved. Investigations revealed relatively low concentrations of methane (average of 0.18 µg/g of sample) in drained soils of tundra, taiga forest and steppe zones, and transition zones between forest and steppe, with a trend of increasing its amount from steppe zone to taiga with increasing soil moisture. Higher concentrations of methane (1–2 orders of magnitude higher) are typical for soils of waterlogged sites and peat deposits of bogs. The distribution along the vertical profile of methane in dry and temporarily flooded soils is characterized by a reduction of its concentrations from the surface to the lower horizons, while in peat deposits of bogs, the concentration of gas, by contrast, increases significantly with depth.

Keywords: methane, concentration, waterlogged and drained soils, tundra, taiga, steppe, peat deposits, vertical distribution.

По генезису метан в почвах подразделяется на автохтонный и аллохтонный. Автохтонный метан формируется биохимическим путем *in situ* в результате жизнедеятельности микроорганизмов

в почвах и/или наследуется со времени начала почвообразования [22]. Метан аллохтонного генезиса может поступать в почвы:

– в результате миграции газа из подстилающих коренных пород, обогащенных органикой, и других глубинных источников (мантия, вулканы, месторождения нефти, газа, угля и прочее) [1, 12, 14 и др.], при этом проводниками метано-газовых флюидов могут служить как глубинные разломы и оперяющие их трещины, так и пористые породы [19]. Как правило, этот метан “перехватывается” почвами и не достигает атмосферы [1, 14];

– вследствие поглощения почвами атмосферного метана. Сорбция метана поверхностью почв может периодически происходить во время извержений вулканов (эруптивные газы) или относительно постоянно в зоне воздействия фумарол (фумарольные газы) [9], однако, как правило, относительное содержание метана в этих газах низкое;

– при инфильтрации атмосферных осадков, которые обычно в незначительных количествах содержат этот газ [5];

– небольшие количества метана могут поступать в почву из грунтовых вод, в результате десорбции и диффузии из твердой и жидкой фаз [22].

Кроме метана природного происхождения на урбанизированных территориях в почвах появляется антропогенный (техногенный) метан, связанный с процессами преобразования ландшафтов (засыпка русел рек и оврагов, подтопление почв сточными водами), проникновением из газо- и нефтехранилищ и продуктопроводов [14], и генерацией газа в телах свалочного грунта [16]. Также возможны сорбция поверхностью почвы метана, поступившего в атмосферу вместе с выхлопными газами транспортных средств, выбросами промышленных предприятий и прочими выбросами, связанными с хозяйственной деятельностью человека.

Независимо от источников, механизмов и путей поступления, метан в почвах накапливается в водной и воздушной среде порового пространства, а также в сорбированном на органоминеральной матрице виде. В сухих почвах большая часть (>80%) метана адсорбирована органоминеральными частицами [3], в обводненных почвах существенно увеличивается его содержание в водной фазе. Поскольку почва имеет микронеональное строение, при котором в каждой микронеоне процессы идут относительно независимо и одновременно, то это дает возможность для развития в близком соседстве аэробных метанооксиляющих и анаэробных метанообразующих микроорганизмов [26]. Наличие анаэробных зон внутри почвенных

агрегатов объясняет возможность протекания анаэробных процессов даже в аэрируемых почвах [13, 27]. Формирование анаэробных зон внутри почвенных агрегатов происходит, когда кислород перехватывается уже на их поверхности, вследствие интенсивно протекающих здесь процессов окисления органического вещества [8]. Многократное чередование аэробных и анаэробных микронеон, а также сложная система пор и капилляров, по которым движется метан, и поверхность которых наряду с почвенными агрегатами заселена микроорганизмами, способствует быстрому перехвату образуемого в почвах газа, вследствие чего существенно сокращается его содержание [18, 25]. Основными процессами, снижающими концентрацию метана в почвах, являются его окисление в почвах и эмиссия в атмосферу. Некоторое количество метана в составе капиллярной и гравитационной воды (в меньшей степени пленочной) поглощается корнями растений [11, 23], а также вымывается из почв атмосферными осадками, после чего может поступать вместе с поверхностным и подземным стоком в водные объекты.

Главными факторами, определяющими интенсивность и направленность окислительно-восстановительных процессов в почвах, в том числе процессов образования и окисления метана, являются состояние увлажнения и аэрации почв, содержание кислорода и легкоразлагаемого вещества в почве, ее температура [3, 5, 6, 8, 18, 21 и др.]. Поскольку перечисленные факторы подвержены суточной, сезонной и многолетней динамике и оказывают разнонаправленное влияние на скорость образования и окисления метана (одни факторы активизируют, другие подавляют), то его содержание и динамика в почвах будет определяться результирующим воздействием этих факторов. В условиях агроценозов деятельность человека (внесение удобрений, гербицидов, осушение, орошение, вспашка) может оказать также значительное воздействие на содержание метана и его динамику. Так, обработка растений гербицидами в дозах, обеспечивающих сплошное действие, может вызывать подавление активности микроорганизмов в почве (в том числе метаногенов) и возрастание Eh [9]. Внесение аммонийных и нитратных соединений азота в почвы приводит к увеличению содержания метана, в результате переключения метанооксиляющих бактерий с окисления метана на окисление ионов аммония [15], что объясняется сходством ключевых ферментов метанмонооксигеназы и аммониймонооксигеназы [24] и конкурентным преимуществом последнего процесса [15]. При механических повреждениях почвенного профиля – вспашка почв, вырубка деревьев, уничтожение лесной

подстилки, частичная корчевка пней и прочее — отмечается разуплотнение верхних почвенных горизонтов, что приводит к облегчению газообмена почвенного воздуха с атмосферой, формированию более окислительных условий и, как следствие, к некоторому уменьшению содержания метана в верхних горизонтах почв (до 30–50 см) [5, 12]. К аналогичным последствиям — снижению содержания метана, вследствие облегчения газообмена воздуха почв с атмосферой — будет приводить осушение болот и переувлажненных почв. В то время как даже небольшое количество влаги в почве наоборот затрудняет газообмен, что способствует образованию анаэробных зон и росту концентраций метана. Избыточное же увлажнение приводит к резкому увеличению его концентраций, вследствие снижения окислительно-восстановительного потенциала почв. Так, согласно [9], при затоплении рисовых полей уже в первые дни наблюдалось значительное уменьшение величины E_h с +382 мВ до –95 мВ. В результате в составе почвенных газов накопилось до 75% метана. При этом метаногенез наиболее интенсивно протекал в верхних 10 см почвы, с глубиной скорость генерации метана заметно снижалась.

В настоящее время механизмы образования и распределения зон генерации метана еще содержат ряд недостаточно изученных аспектов, и, в частности, имеется пробел, касающийся оценки масштабов и закономерностей образования и распределения метана в почвах различного типа [6, 13]. Поэтому основной целью данного исследования является обобщение и анализ собственных материалов и литературных источников, касающихся особенностей и закономерностей распределения метана в сухих и обводненных почвах тундры, тайги и степей.

Районы, материалы и методы исследования. Авторами обобщены и проанализированы экспериментальные данные по распределению содержания метана в почвах нижнедонской степной провинции (юг Ростовской области) [6] и подзоны типичной (средней) тайги (Карелия) [5], лесоболотных ландшафтов Архангельской [20], Псковской [21] и Московской областей. Также привлечены данные литературных источников [1, 2, 3, 7 и др.].

Болото Иласское (Архангельская область) представляет собой систему простых болотных массивов, находящихся на стадиях плоско-выпуклых олиготрофных грядово-мочажинных болотных массивов с озерково-мочажинными центральными частями. Болотная система в целом является характерным представителем архангельского типа при беломорской провинции торфяников [10],

занимающих значительные площади в Архангельской и смежных с ней областях. Торфяная залежь (мощностью до 7 м), подстилаемая супесями и суглинками, сложена в основном верховыми торфами, среди которых преобладает фускум-торф [20]. Степень разложения торфа невелика: в верхней половине разреза — 10–15%, в нижней — до 20–25%.

Полистово-Ловатскую болотную систему (Псковская область), расположенную в междуречье рек Полисть и Ловать, впадающих в оз. Ильмень, образуют 15 слившихся олиготрофных болотных массивов Ладожско-Ильменско-Западнодвинской провинции олиготрофных грядово-мочажинных болот зоны выпуклых олиготрофных торфяников [10]. Торфяная залежь, подстилаемая валунными суглинками, местами оглеенными, сложена в основном верховыми торфами со средней мощностью 3.5–5 м и степенью разложения от 10–15% в верхних горизонтах залежи до 50–60% — в нижних. Среди торфов преобладает магелланикум-торф, из переходных торфов обычен шейхцериевый [21].

Радиловский болотный массив расположен в 90 км северо-западнее Полистово-Ловатской болотной системы (Порховский район Псковской области). Он приурочен к Хиловской низине и имеет обилие моренных гряд и холмов в основном песчаного и супесчаного состава. Речная сеть относится к бассейну р. Шелонь, впадающей в оз. Ильмень [21].

Содержания метана в нижнедонской степной провинции были определены в следующих наиболее типичных для Ростовской области почвах: черноземах обыкновенных и южных, лугово-черноземных почвах на водоразделах и аллювиальных лугово-черноземных почвах в поймах рек, темнокаштановых и каштановых почвах, а также в солончаках [6]. В подзоне средней тайги (Карелия, водосбор Онежского озера) уровень содержания метана и особенности его распределения изучены в подзолистых почвах [5]. Помимо содержания метана, определялись влажность и плотность верхнего гумусового перегнойно-аккумулятивного горизонта почв, а также величина их окислительно-восстановительного потенциала (E_h).

Отбор проб воды и грунтов (почв, торфа, донных отложений) осуществлялся в соответствии с методикой, описанной в работах [5, 6, 20, 21]. Воду для определения содержания метана отбирали в поверхностном горизонте (0.1 м) в стандартные стеклянные флаконы полной вместимостью 42 мл, подготовленные для парофазного анализа [23]. Для отбора проб почв и торфа закладывались шурфы, в стенках которых с различных горизонтов

мерником отбирали по 3 мл грунтов. В случаях слабообводненного и сильнообводненного торфа точку отбора проб смещали на необходимый участок, где возможно было сделать прикопку. Донные отложения отбирали в прибрежной зоне водных объектов с глубинами до 0.5 м с помощью специальной трубки длиной 400 мм и диаметром 45 мм из прозрачного оргстекла с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем. Далее с различных горизонтов отобранного керна устройством — мерником извлекали по 1.5 мл донных отложений. Отобранные пробы грунтов вносили в стандартные стеклянные флаконы, заполненные до риски дистиллированной водой с консервантом. В качестве консерванта проб воды и грунтов использовали насыщенный раствор сулемы (HgCl_2). Хранение и транспортировку в лабораторию флаконов с пробами осуществляли в соответствии с методикой [23]. Газохроматографическое определение метана выполнено в лаборатории Гидрохимического института методом фазово-равновесной дегазации на хроматографе “Цвет-100” с пламенно-ионизационным детектором и устройством для парофазного анализа с пневматическим способом дозирования. Нижний предел обнаружения метана в воде составляет 0.1 мкл/л, в грунтах — 0.01 мкг/г влажной пробы, суммарная погрешность — 5–10%.

Результаты и их обсуждение. В исследованных авторами [20] верхних горизонтах (до 10 см) почв ландшафтов Иласского болотного массива, расположенного в пределах подзоны северной тайги (Архангельская область, 20 км на юго-восток от г. Архангельска) в бассейне р. Северной Двины, наиболее высокие концентрации метана наблюдались в торфяных залежах, приуроченных к мочажинам (таблица). Здесь его содержание изменялось в диапазоне 0.44–2.75 мкг/г влажной пробы, с максимумом в сфагново-пушицевых мочажинах с открытой водной поверхностью (слой воды над торфяной залежью до 2–3 см, а содержание метана в воде — 1205.4 мкл/л). Минимальные содержания метана (в среднем 0.06 мкг/г) были характерны для гряд, что связано с меньшей их влажностью и, как следствие, большей аэрацией их поверхности, способствующей активному метаноокислению. Содержания метана в воде и торфе озерков (слой воды до 10 см) варьировали, соответственно, в пределах 165.4–308.0 мкл/л и 0.07–0.29 мкг/г и занимали промежуточные значения между содержанием метана в торфяных залежах мочажин и гряд. Что касается изученных древесно-моховых и древесно-травяных групп лесотопяных ландшафтов, то здесь концентрация метана в поверхностном слое торфа была несколько выше, чем на грядах, составляя в среднем 0.37 мкг/г влажной пробы.

В целом содержание метана в ландшафтах исследованного болота [20] подзоны северной тайги сопоставимо с его содержанием в переувлажненных почвах и болотах тундры Западной Сибири [3] и значительно выше содержания метана в болотных почвах заполярной тундры [2] (см. таблицу). Это, вероятно, обусловлено особенностями температурного режима (заполярная тундра характеризуется более низкими температурами). Близкие по величине концентрации метана определены нами и в подзоне южной тайги на севере Московской области (20 км к юго-востоку от г. Талдом) в районе торфоразработок и нетронутых участков лесоболотных ландшафтов заповедника “Журавлиная Родина”.

В исследованных нами [21] ландшафтах Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского болотного массива, расположенных, в пределах Псковской области, в зоне смешанных лесов, концентрация метана была выше, чем в зоне тайги, что также, по всей видимости, обусловлено температурным фактором. Температура приземного воздуха в период наблюдений (июль) на территории Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского болотного массива достигала 27 °С [21], в то время как на территории Иласского болотного массива (июль) не превышала 20 °С [20]. Содержание метана в пробах болотных вод, отобранных с поверхности различных типов ландшафтов, варьировало в пределах — от 17.0 до 7600.0 мкл/л. Максимальные концентрации (1300.0–7600.0 мкл/л) были характерны для сильно обводненных черных мочажин грядово-мочажинного комплекса и микроландшафтов переходных топей. Несколько меньше метана содержится в болотных водах пушицево-сфагновых мочажин (424.0–520.6 мкл/л) грядово-мочажинного комплекса и микроландшафтов сфагновых топей (227.0–433.0 мкл/л).

Содержание метана в пробах, отобранных в верхнем 15-сантиметровом горизонте торфяной залежи и почв, изменялось в диапазоне от <0.01 до 33.0 мкг/г влажной пробы. Его максимальные концентрации приурочены к торфам озерно-денудационного комплекса (2.71–29.8 мкг/г) и топяных микроландшафтов (1.84–33.0 мкг/г), минимальные — к торфам, расположенным на приподнятых в рельефе участках (гряды и бугры), и почвам лесных и лесоболотных ландшафтов. Как было отмечено ранее, приподнятость в рельефе, а значит меньшая обводненность участков, способствует большей аэрации поверхности, что, с одной стороны, ускоряет вынос метана в атмосферу, а с другой способствует

притоку кислорода из атмосферы в почву. Последнее приводит к ингибированию образования метана метаногенами и активизации его окисления метанотрофами [3, 7, 20, 21 и др.].

Для воды и донных отложений озер и рек изучаемых болот Псковской области характерны повышенные концентрации метана (соответственно 17.0–433.0 мкл/л и 8.31–70.0 мкг/г), по сравнению с большинством водоемов и водотоков, расположенных на северо-западе европейской территории России за пределами болотных массивов [4, 23]. Наиболее высокие концентрации метана (425.7–433.0 мкл/л) зафиксированы в воде

покрытых осоками прибрежных территорий озер и рек (см. таблицу).

По вертикальному профилю почв водно-болотных ландшафтов, а также донных отложений водных объектов, на фоне высоких концентраций метана по всему профилю, наблюдается увеличение содержания газа с глубиной, обусловленное главным образом снижением окислительно-восстановительного потенциала (Eh) среды в данном направлении [21], что благоприятствует деятельности метанобразующих архей. Некоторое влияние на концентрации метана в нижних горизонтах почв и осадков будет оказывать их уплотнение,

Таблица. Концентрация метана в воде, почвах и торфах ландшафтов различных географических зон

Экосистемы и ландшафты	Концентрация CH ₄ *	
	в воде, мкл/л	в грунтах, мкг/г
<i>Тундровые экосистемы Западной Сибири (0–99 см) (по [3]): **</i>		
Наиболее сухие почвы	–	<u>0.001–0.007</u> 0.004
Переувлаженные почвы	–	<u>0.0005–2.15</u> 0.18
Болота	<u>3.0–158.0</u> 60.0	<u>0.0005–4.56</u> 1.65
Сухие болота	–	<u>0.03–5.11</u> 2.13
Моховая кочка	–	<u>0.001–0.002</u> 0.0014
<i>Заполярная тундра (0–20 см) (по [2]): **</i>		
Осоково-сфагновое болото, бугорковая кочка, мелкобугристый западинный комплекс	–	<u>0.0004–0.005</u> 0.002 (20)
<i>Северная тайга, ландшафты Иласского болотного массива Архангельской области (0–10 см) (по [20]):</i>		
Грядово-озерковый комплекс, озерки (до 1000 м ²)	<u>165.4–308.0</u> 219.6 (3)	<u>0.07–0.29</u> 0.15 (5)
Грядово-мочажинный комплекс (мочажины и гряды)	1205.4 (1)	<u>0.03–2.75</u> 0.13 (10)
Лесотопяные микроландшафты, древесно-моховые и древесно-травяные группы	–	<u>0.03–0.60</u> 0.37 (3)
<i>Южная тайга, ландшафты заповедника “Журавлиная Родина”, Московская область (0–10 см)</i>		
Сосново-пушицево-сфагновое и кустарничково-сфагново-пушицевое сообщества	<u>107.4–154.5</u> 131.0 (2)	–

Таблица. Окончание

Экосистемы и ландшафты	Концентрация CH ₄ *	
	в воде, мкл/л	в грунтах, мкг/г
<i>Смешанные леса, ландшафты Полистово-Ловатской болотной системы и Радилковского болотного массива Псковской области (0–15 см) (по [21]):</i>		
Водно-болотные ландшафты (грядово-мочажинные, озерно-денудационные комплексы и мохово-травяные группы топяных микроландшафтов)	<u>17.3–7600.0</u> 1510.4 (10)	<0.01–33.3 7.46 (21)
Лесоболотные ландшафты (вершинные сосново-сфагновые и сосново-пушицево-сфагновые комплексы)	25.7–185.8 (2)	<u>0.02–2.70</u> 0.55 (12)
Лесные ландшафты	–	<u>0.01–0.05</u> 0.24 (5)
Водные ландшафты (озера, реки, дренажные каналы)	<u>17.0–433.0</u> 145.2 (12)	<u>8.31–70.0</u> 34.3 (13)
<i>Типичная (средняя) тайга, лесные почвы, Карелия (0–35 см) (по [5]):</i>		
Подзолистые почвы	–	<0.01–9.9 0.85 (40)
<i>Степные почвы, юг Ростовской области (0–150 см) (по [6]):</i>		
черноземы обыкновенный и южный	–	< <u>0.01–0.07</u> 0.02 (27)
аллювиальные лугово-черноземные почвы	–	< <u>0.01–15.1</u> 1.0 (38)
каштановые почвы	–	< <u>0.01–0.03</u> 0.01 (8)
солончаки	–	< <u>0.01–0.02</u> 0.01 (7)

Примечание. * – В числителе приведены пределы изменения, в знаменателе – средние значения, в скобках – количество измерений, прочерк (–) – измерения не проводились; ** – в работах [2, 3] концентрация метана в грунтах приведена в мкл/л. При пересчете концентрации в мкг/г нами принято, что масса 1 мл грунта составляет 1.5 г.

затрудняющее миграцию метана и, тем самым, увеличивающее накопление его в местах образования. Распределение метана по вертикальному профилю почв лесных и лесоболотных ландшафтов, напротив, наряду с низкими концентрациями метана характеризовалось уменьшением его концентраций от поверхности к нижним горизонтам, что обусловлено, главным образом, снижением в этом направлении количества и лабильности органических веществ, содержащихся в почвах, а также их влажности [21]. Аналогичные закономерности распределения величин Eh и концентраций метана по вертикальному профилю (до 1 м) наблюдались в болотах

тундровых экосистем [3] и средней тайги [17], где увеличение с глубиной степени анаэробности сопровождалось активизацией метаногенеза и, как следствие, ростом концентраций метана, особенно резким (на 1–3 порядка) на границе торфяных и минеральных горизонтов. В сухих тундровых почвах, как и в сухих почвах ландшафтов смешанных лесов, несмотря на окислительные условия среды, максимальные концентрации метана часто выявлялись в верхних горизонтах, что коррелировало с содержанием органического вещества [3].

В исследованных почвах степной зоны (юг Ростовской области) содержание метана изменялось

в пределах от <0.01 до 15.1 мкг/г влажной почвы (медиана – 0.02 мкг/г (см. [6]); $n = 80$) (см. таблицу), что сопоставимо с его содержанием в наиболее сухих почвах тундры [2, 3]. Максимальные его концентрации установлены в аллювиальных лугово-черноземных почвах, для которых характерна высокая влажность. Минимальные концентрации метана зафиксированы в темно-каштановых и каштановых почвах, а также в солончаках. В задернованных почвах, по сравнению с распаханнами, установлен более высокий уровень содержания метана, поскольку при вспашке облегчается обмен почвенного воздуха с атмосферой, что приводит к более интенсивному выделению метана в атмосферу из-за разуплотнения почв, особенно в начальный период после вспашки, а также способствует окислению метана в почвах и ингибированию его образования из-за притока кислорода из атмосферы. Распределение метана по почвенному профилю (исследован до глубины 1.5 м), как правило, характеризовалось снижением его концентраций до значений ниже предела обнаружения от поверхности к нижним горизонтам, что главным образом обусловлено уменьшением количества и лабильности органических веществ, содержащихся в почвах [6]. Наблюдается отчетливая тенденция уменьшения содержания метана в почвах по мере снижения температуры воздуха с 26 до 5°C от сентября к ноябрю ($r = 0.58$).

В исследованных подзолистых почвах Карелии (подзона типичной (средней) тайги) содержание метана варьирует в диапазоне от <0.01 до 9.9 мкг/г влажной почвы (медиана – 0.12 мкг/г) (см. таблицу), что в среднем несколько выше, чем в почвах степей [6] и тундры [2, 3]. По почвенному профилю (исследован до глубины 0.35 м), как правило, фиксируется снижение концентрации метана от поверхностного гумусово-аккумулятивного горизонта к подповерхностному сильно-вымывтому обычно палевого цвета подзолисто-гумусовому горизонту. Ниже, в темно-буром иллювиально-гумусовом горизонте, отчетливо фиксируется увеличение метана, нередко превышающее его содержание в поверхностном гумусово-аккумулятивном слое. Далее по разрезу количество метана постепенно снижается. Максимальные содержания метана определены в поверхностном сильно увлажненном гумусово-аккумулятивном слое почв, в котором присутствует большая масса частично разложившейся лесной подстилки, характеризующейся наиболее высокими концентрациями лабильных органических веществ и повышенной влажностью [18].

По всей видимости, концентрация метана в почвах пустынь и полупустынь из-за недостатка влаги,

обуславливающей низкое содержание органических веществ, содержащихся в почвенных растворах, и повышенную аэрацию почв, будет минимальным, по сравнению со всеми остальными природными зонами России.

Что касается почв на городских территориях, то обычно они характеризуются невысоким уровнем содержания метана [18]. Большой потенциал для образования метана обнаружен только в местах избыточного увлажнения (на дне оврагов), где наблюдается аккумуляция органического вещества. Почвы и грунты придорожных и придомовых территорий (газонов) могут содержать повышенные концентрации метана, что объясняется ростом содержания тяжелых металлов в почвах, ингибирующей активностью ферментов метанмонооксигеназы у метанотрофных бактерий [18]. В рекреационных зонах содержание метана незначительно, за исключением тропинойной сети, где происходит резкое уменьшение притока кислорода в почву при вытаптывании.

Заключение. В дренированных почвах тундры, таежно-лесной и степной зон, а также переходных зон между лесом и степью выявлены относительно невысокие концентрации метана с тенденцией увеличения его количества от степи к тайге, по мере возрастания влажности почв. Наиболее высокие концентрации метана (на $1-2$ порядка выше, чем в сухих почвах) характерны для почв переувлажненных участков (гидроморфные почвы) и торфяных залежей болот, содержащих большое количество органических веществ и имеющих низкий окислительно-восстановительный потенциал среды.

Распределение содержания метана в дренированных почвах по вертикальному профилю, наряду с низкими концентрациями метана характеризуется уменьшением его концентраций от поверхности к нижним горизонтам, что связано, главным образом, со снижением в этом направлении влажности почв, а также количества и лабильности органических веществ. Во временно затопляемых почвах вертикальный профиль содержания метана идентичен сухим почвам, отличием является более низкое его содержание в последних. В торфяных залежах болот концентрация метана, напротив, значительно возрастает с глубиной, что обусловлено, как увеличением степени разложения торфов, так и снижением окислительно-восстановительного потенциала (Eh).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-17-01229).

Aknowledgements. The work is supported by the Russian Science Foundation, project no. 17-17-01229).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева Н.И.* Роль черноземов в регулировании эмиссии метана на газоносной территории. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 25 с.
2. *Берестовская Ю.Ю., Русанов И.И., Васильева Л.В., Пименов Н.В.* Процессы образования и окисления метана в почвах заполярной тундры России // *Микробиология*. 2005. Т. 74, № 2. С. 261–270.
3. *Гальченко В.Ф., Дулов Л.Е., Крамер Б., Конова Н.И., Барышева С.В.* Биогеохимические процессы цикла метана в почвах, болотах и озерах Западной Сибири // *Микробиология*. 2001. Т. 70, № 2. С. 215–225.
4. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А.* Метан в воде рек Европейской территории России: особенности распределения и районирование // Сб. матер. Междунар. научно-практ. конф. LXV Герценовские чтения “География: проблемы науки и образования”. СПб.: Астерион, 2012. С. 114–116.
5. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А.* Особенности распределения содержания метана в прибрежных участках Петрозаводской губы Онежского озера // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42, № 3. С. 288–297.
6. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С.* Эмиссия метана из почв Ростовской области // *Аридные экосистемы*. Т. 17, № 4 (49). 2011. С. 44–52.
7. *Глаголев М.В.* Элементы количественной теории процессов образования и потребления метана в воде // Сб. матер. III Научной Школы “Болота и биосфера”. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2004. С. 39–52.
8. *Звягинцев Д.Г.* Почва и микроорганизмы. М.: Изд-во Моск ун-та, 1987. 255 с.
9. Земледелие от “А” до “Я”. URL: <http://racechrono.ru/> (дата обращения: 26.07.2017 г.).
10. *Кац Н.Я.* Болота земного шара. М.: Наука, 1971. 295 с.
11. *Кеплер Ф., Рекманн Т.* Метан и изменение климата // *В мире науки*. 2007. № 5. С. 65–69.
12. *Крейнин Е.В., Кяргес А.А.* Экспериментальные исследования состояния почв (по содержанию метана) в районе углеметановых скважин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. Т. 13, № 1. С. 422–438.
13. *Минько О.И.* Генерация углеводородного газа почвенным покровом планеты // *Геохимия*. 1991. № 1. С. 3–14.
14. *Можарова Н.В.* Функционирование и формирование почв над подземными хранилищами природного газа. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ. 2009, 48 с.
15. *Новиков В.В., Степанов А.Л.* Влияние минерального азота на процессы микробной трансформации метана в почвах // *Почвоведение*. 1999. № 10. С. 1255–1258.
16. *Ножневникова А.Н.* Мусорные залежи – “метановые бомбы” планеты // *Природа*. 1995. № 6. С. 25–34.
17. *Сидоров Д.Г., Борзенков И.А., Беляев А.С., Миллер Ю.М., Иванов М.В.* Микробиологические процессы в толще верхового болота средней тайги // *Микробиология*. 1998. Т. 67, № 2. С. 255–260.
18. *Степанов А.Л.* Образование и поглощение парниковых газов в почвах // *Почвы в биосфере и жизни человека: монография*. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. С. 118–134.
19. *Федоров Ю.А.* Особенности мониторинга, контроля и прогноз деятельности подводных грязевых вулканов // *Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей: монография / Под. ред. К.П. Колтерманна, С.А. Добролюбова, Н.И. Алексеевского*. М.: Триумф, 2012. С. 22–32.
20. *Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Хромов М.И.* Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // *Изв. РГО*. 2008. Т. 140, Вып. 5. С. 40–48.
21. *Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В.* Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // *География и природные ресурсы*. 2015. № 1. С. 88–97.
22. *Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В., Крукиер М.Л.* Уровни содержания и особенности распределения метана в почвах европейской территории России // Сб. матер. Междунар. научной конф. “Современное состояние черноземов”. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. С. 326–328.
23. *Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О.* Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов н/Д–М.: ЗАО “Ростиздат”, 2007. 330 с.
24. *Bodelier P.L.E. and Frenzel P.* Contribution of methanotrophic and nitrifying bacteria to CH₄ and NH₄⁺ oxidation in the rhizosphere of rice plants as determined by new methods of discrimination // *Appl. Environ. Microbiol.* 1999. Vol. 65. P. 1826–1833.
25. *Vecherskaya M.S., Galchenko V.F., Sokolova E.N., and Samarkin V.A.* Activity and species composition of aerobic methanotrophic communities in tundra soils // *Current Microbiol.* 1993. Vol. 27. P. 181–184.
26. *Wagner D.M., Pfeiffer E., Mand E., and Bockb E.* Methane production in aerated marshland and model soils: effects of microflora and soil texture // *Soil Biol. and Biochem.* 1999. Vol. 31. P. 999–1006.
27. *Wang F.L. and Bettany J.R.* Methane emission from a usually well-drained prairie soil after snowmelt and precipitation // *Can. J. Soil Sci.* 1995. Vol. 75. P. 239–241.

REFERENCES

1. Belyaeva N.I. The role of humus in the regulation of methane emissions from the gas-bearing territory. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2007. 25 p.
2. Berestovskaya Ju.Ju., Rusanov I.I., Vasil'eva L.V., Pimenov N.V. The processes of formation and oxidation

- of methane in soils of the Arctic tundra of Russia. *Mikrobiologiya*, 2005, vol. 74, no. 2, pp. 261–270. (In Russ.).
3. Gal'chenko V.F., Dulov L.E., Kramer B., Konova N.I., Barysheva S.V. Biogeochemical processes of methane cycle in the soils, swamps and lakes of Western Siberia. *Mikrobiologiya*, 2001, vol. 70, no. 2, pp. 215–225. (In Russ.).
 4. Gar'kusha D.N., Fedorov Ju. A. Methane in the water of rivers of the European territory of Russia: features of distribution and zonation. In *Geografiya: problemy nauki i obrazovaniya* [Geography: Problems of Science and Education]. St. Petersburg: Asterion Publ., 2012, p. 114–116.
 5. Gar'kusha D.N., Fedorov Ju. A. Distribution of methane concentration in coastal areas of the Gulf of Petrozavodsk, Lake Onega. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 288–297.
 6. Gar'kusha D.N., Fedorov Ju. A., Tambieva N.S. The emission of methane from the soils of Rostov region. *Aridnyye Ekosistemy*, vol. 17, no. 4 (49), 2011, pp. 44–52. (In Russ.).
 7. Glagolev M.V. Elementy kolichestvennoi teorii protsessov obrazovaniya i potrebleniya metana v vode. In *Bolota i biosfera* [Bogs and Biosphere]. Tomsk: CNTI Publ., 2004, pp. 39–52.
 8. Zvyagintsev D.G. *Pochva i mikroorganizmy* [Soil and Microorganisms]. Moscow: Moscow State Univ., 1987. 255 p.
 9. *Zemledelie ot "A" do "Ya"* [Agriculture from "A" to "Z"]. Available at: <http://racechrono.ru/> (accessed: 26.07.2017).
 10. Kac N.Ya. *Bolota zemnogo shara* [Swamp of the Globe]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 295 p.
 11. Kepler F., Rekmann T. Methane and climate change. *V Mire Nauki*, 2007, no. 5, pp. 65–69. (In Russ.).
 12. Kreinin E.V., Kyarges A.A. Experimental study of soil condition (methane) in the coal-methane wells. *Gornyi Informatsionno-Analiticheskii Byulleten'*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 422–438. (In Russ.).
 13. Min'ko O.I. Generation of hydrocarbon gas soil cover of the planet. *Geokhimiya*, 1991, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.).
 14. Mozharova N.V. The functioning and formation of soil above the underground storage of natural gas. *Extended Abstract of Dokt. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2009. 48 p.
 15. Novikov V.V., Stepanov A.L. Influence of mineral nitrogen on the processes of microbial transformation of methane in soils. *Pochvovedenie*, 1999, no. 10, pp. 1255–1258. (In Russ.).
 16. Nozhevnikova A.N. Deposits of trash – “methane bomb” of the planet. *Priroda*, 1995, no. 6, pp. 25–34. (In Russ.).
 17. Sidorov D.G., Borzenkov I.A., Belyaev A.S., Miller Ju.M., Ivanov M.V. Microbial processes in the thickness of the raised bog in middle taiga. *Mikrobiologiya*, 1998, vol. 67, no. 2, pp. 255–260. (In Russ.).
 18. Stepanov A.L. Formation and absorption of greenhouse gases in soils. In *Pochvy v biosfere i zhizni cheloveka* [Soil in the Biosphere and Human Life]. Moscow: MGUL, 2012, p. 118–134. (In Russ.).
 19. Fedorov Ju. A. Specific features of monitoring, controlling and forecast activities of submarine mud volcanoes. In *Prirodnye i sotsial'nye riski v beregovoi zone Chernogo i Azovskogo morei* [Natural and Social Risks in the Coastal Zone of the Black and Azov Seas], Koltermann K.P., Dobrolyubov S.A., Alekseevskii N.I., Eds. Moscow: Triumph Publ., 2012, p. 22–32. (In Russ.).
 20. Fedorov Ju. A., Gar'kusha D.N., Hromov M.I. Methane Emission from peat deposits Russkogo bog Arkhangel'sk region. *Izv. Russ. Geogr. obshchestva*, 2008, vol. 140, no. 5, pp. 40–48. (In Russ.).
 21. Fedorov Ju. A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane Emission from peat deposits of raised bogs in Pskov Oblast., *Geography and Natural Resources*, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 88–97.
 22. Fedorov Ju. A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V., Kruker M.L. Levels and features of the distribution of methane in the Soils of European Russia]. In *Sovremennoe sostoyanie chernozemov* [The Current State of the Chernozem Soils]. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2013, pp. 326–328.
 23. Fedorov Ju. A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Horoshevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in Aquatic Ecosystems]. Rostov-on-Don, Moscow: Rostizdat Publ., 2007. 330 p.
 24. Bodelier P.L.E., Frenzel P. Contribution of methanotrophic and nitrifying bacteria to CH₄ and NH₄⁺ oxidation in the rhizosphere of rice plants as determined by new methods of discrimination. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, vol. 65, pp. 1826–1833.
 25. Vecherskaya M.S., Galchenko V.F., Sokolova E.N., Samarkin V.A. Activity and species composition of aerobic methanotrophic communities in tundra soils. *Current Microbiol.*, 1993, vol. 27, pp. 181–184.
 26. Wagnera D.M., Pfeiffera E., Mand E., Bockb E. Methane production in aerated marshland and model soils: effects of microflora and soil texture. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, vol. 31, pp. 999–1006.
 27. Wang F.L., Bettany J.R. Methane emission from a usually well-drained prairie soil after snowmelt and precipitation. *Can. J. Soil Sci.*, 1995, vol. 75, pp. 239–241.