

Д.Н. Гарькуша, Р.Г. Трубник, Л.Ю. Дмитрик

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону (Россия)

ВЛИЯНИЕ ПОЧВ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ)

Аннотация. Влияние почвенного покрова на формирование концентраций метана в поверхностных водах суши проявляется при вымывании метана из почв атмосферными осадками и талыми водами и последующем поступлении в водные объекты как напрямую, в составе поверхностного стока, так и после инфильтрации через почву в составе подземного стока. Влияние сухих (незаболоченных) почв несущественно и напрямую не оказывает какого-либо заметного воздействия на распределение и динамику концентраций метана в водных экосистемах. Роль почв повышается на заболоченных территориях, но в целом даже здесь их влияние носит подчиненный характер. Более заметное влияние почв на концентрации метана в воде водных объектов наблюдается при затоплении почв в ходе наводнений или подтопления территорий, а также в результате заполнения водой ложа водохранилищ, прудов и других искусственных сооружений. Выполненная ориентировочная оценка глобального выноса почвенного метана в водные экосистемы вместе с плоскостным стоком показала, что его величина незначительна и варьирует в пределах от 720 до 3240 тонн в год.

Ключевые слова: метан, формирование концентраций, водные экосистемы, почвы, водная эрозия, плоскостной сток.

D.N. Gar'kusha, R.G. Trubnik, L.Yu. Dmitrik

Southern Federal University, Rostov-on-Don (Russia)

THE INFLUENCE OF SOILS ON THE FORMATION OF METHANE CONCENTRATIONS IN WATER ECOSYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF EUROPEAN RUSSIA)

Abstract. The influence of soil cover on the formation of methane concentrations in surface waters of the land is evident in the leaching of methane from soils by rainfall and melt water, and subsequent flow into water bodies, either directly in the composition of surface runoff and infiltration through the soil by groundwater flow. The influence of dry soils is insignificant and does not directly cause any significant impact on the distribution and dynamics of methane concentrations in aquatic ecosystems. Increased role of soils in the wetlands, but in General even here their influence is of a subordinate nature. Greater influence of soils on methane concentration in water of water objects is observed in case of flooding of soils during floods or flooded areas, and also as a result of flooding the reservoir beds, ponds and other artificial structures. Approximate estimation of global soil methane removal in aquatic ecosystems, together with planar flow showed that its size is insignificant and ranges from 720 to 3240 tons per year.

Keywords: methane; the formation of concentrations; water ecosystems; soils; water erosion; planar flow.

Введение

Особый интерес ученых различного профиля к процессам формирования в водных экосистемах концентраций метана, являющегося простейшим представителем подгруппы предельных углеводородов, объясняется несколькими моментами. Во-первых, изучение условий образования и закономерностей распределения метана в воде и отложениях водоемов различного типа традиционно представляет интерес как поисковый критерий нефтегазоносности акваторий. Во-вторых, с конца прошлого века большое внимание стало уделяться изучению закономерностей распределения метана в различных водных экосистемах в связи с проблемой глобального изменения климата, а также значительной его ролью в атмосферных химических реакциях и, в частности, в процессах разрушения озонового слоя. В-третьих, микробиологические процессы цикла метана в водных экосистемах имеют большую экологическую значимость, поскольку влияют на их функциональные особенности [25]. Так, при бактериальном окислении метана снижается содержание растворенного кислорода, выделяется CO_2 и образуется органическое вещество в процессе хемосинтеза. В последнее время интерес к этому газу усилился в связи с подтверждением возможности использования показателя «метан» для оценки уровня загрязненности водоемов [10].

Согласно ранее проведенному районированию Европейской территории России (ЕТР) [6] средние концентрации метана в воде водотоков гидрографических районов ЕТР изменяются в пределах 12.8–50 мкл/л; среднее значение для всей ЕТР составляет 38.8 мкл/л. Минимальные средние концентрации метана отмечаются в водотоках Кавказа, максимальные характерны для бассейна реки Дон и водотоков Северо-Запада ЕТР. Уровень содержания метана в водотоках выделенных гидрографических районов вне зон сильного антропогенного загрязнения и эвтрофирования варьирует в пределах 0.1–59.5 мкл/л, различие между средними концентрациями метана в воде выделенных районов (кроме Кавказа) незначительно, с тенденцией увеличения в направлении с севера на юг (с 24.5 до 26.3 мкл/л). При этом уровень содержания метана в воде зон сильного антропогенного загрязнения и эвтрофирования в 3.2–7.0 (в среднем в 4.3) раз превышает уровень содержания в воде участков рек, расположенных вне этих зон.

К факторам, непосредственно формирующим содержание метана в водных экосистемах, относятся: его образование и окисление соответственно метаногенными археями и метанотрофными бактериями в водной толще; эмиссия метана на границах раздела «вода – атмосфера» и «дно – вода», в том числе из сипов, вулканов, разломов и т.д.; поступление метана с поверхности водосбора, в том числе с притоками, с тальми и ливневыми водами, вследствие эрозии почв и абразии берегов, в составе хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод, а также с подземными водами и атмосферными осадками. Влияние некоторых из перечисленных факторов на формирование концентраций метана в водных экосистемах слабо изучено, и в частности, такого процесса, как водная эрозия почв. Между тем, в статье [26] высказано мнение, что одним из основных источников метана в реках Потомак и Элси, водосбор которых расположен в субтропическом поясе Северной Америки, может являться вынос метана из почвы.

В настоящей работе на примере Европейской территории России оценена роль почв в формировании содержания метана в водных экосистемах.

Материалы и методы исследований

В статье проанализированы и сопоставлены результаты экспериментальных определений концентраций метана в пробах почв, торфа, донных отложений, воды водоемов и водотоков, атмосферных осадков, поверхностных ливневых и дренажных стоков, талых, подземных и болотных вод тундровых экосистем, северной, средней (типичной) и южной тайги, смешанных лесов, степных почв. Отбор проб почв, торфа, донных отложений, атмосферных осадков, поверхностных, подземных и болотных вод осуществлялся в соответствии с мето-

дикой, описанной в работах [7–9; 13; 16; 23–25]. Определение метана выполнено в лаборатории ФГБУ «Гидрохимический институт» (г. Ростов-на-Дону) на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе согласно аттестованным методикам анализа [18; 19]. 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

По генезису метан в почвах подразделяется на автохтонный и аллохтонный [9]. Автохтонный метан формируется биохимическим путем *in situ* в результате жизнедеятельности микроорганизмов в почвах и/или наследуется со времени начала почвообразования. Метан аллохтонного генезиса может поступать в почвы, главным образом, в результате миграции газа из подстилающих коренных пород и других глубинных источников (например, газовых залежей) [1], а также вследствие поглощения почвами атмосферного метана и инфильтрации атмосферных осадков. Наиболее высокая доля аллохтонного метана в почвах, как правило, наблюдается на локальных участках территорий с засушливым климатом, где имеются разрывные дислокации над нефтяными и газовыми резервуарами [27; 31; 32]. В регионах с более влажным климатом доля аллохтонного метана в почвах существенно снижается, и уровень его содержания определяется процессами современного метаногенеза, что подтверждается результатами изотопного анализа [27; 32; 33].

Кроме метана природного происхождения на урбанизированных территориях в почвах появляется антропогенный метан, связанный с процессами преобразования ландшафтов (засыпка русел рек и оврагов, подтопление почв сточными водами), проникновением из газо- и нефтехранилищ и продуктопроводов [15], и генерацией газа в телах свалочного грунта [17]. Также возможны сорбция поверхностью почвы метана, поступившего в атмосферу вместе с выхлопными газами транспортных средств [22], выбросами промышленных предприятий и прочими выбросами, связанными с хозяйственной деятельностью человека [3].

Проведенный в работе [9] анализ собственных материалов и данных литературных источников показал, что уровень содержания метана в изученных почвах, главным образом, контролируется степенью увлажнения почв, количеством содержащихся в почвенных растворах легкоокисляемых органических веществ и температурным режимом приземного слоя воздуха. Перечисленные факторы в совокупности определяют интенсивность и направленность протекающих в почвенных горизонтах биогеохимических процессов, в том числе образования, окисления и эмиссии метана, и свидетельствуют о преимущественно автохтонном генезисе газа. В соответствии с установленными факторами в сухих почвах тундры, таежно-лесной и степной зон, а также переходных зон между лесом и степью выявлены относительно невысокие концентрации метана (табл. 1) с тенденцией увеличения его количества от степи к тайге по мере возрастания влажности почв. По всей видимости, концентрация метана современного биохимического происхождения в почвах пустынь и полупустынь из-за недостатка влаги, обуславливающей низкое содержание органических веществ, содержащихся в почвенных растворах, и повышенную аэрацию почв, будет еще меньше. 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. Что касается почв на городских территориях, то обычно они характеризуются невысоким уровнем содержания метана [21].

Таблица 1. Концентрация метана в воде, почвах и торфах ландшафтов различных географических зон

Экосистемы и ландшафты	Содержание CH ₄	
	в воде, мкл/л	в грунтах, мкг/г
Тундровые экосистемы Западной Сибири (горизонты 0-99 см) (по [5])	<u>3,0-158,0</u> 60,0	<u>0,001-5,11</u> 0,79
Заполярная тундра (горизонты 0-20 см) (по [2])	-	<u>0,0004-0,005</u> 0,002 (20)
Северная тайга, ландшафты Иласского болотного массива Архангельской области (горизонты 0-10 см) (по [23])	<u>165,4-1205,4</u> 466,1 (4)	<u>0,03-2,75</u> 0,18 (18)
Южная тайга, ландшафты заповедника «Журавлиная родина», Московская область (горизонты 0-10 см)	<u>107,4-154,5</u> 131,0 (2)	-
Смешанные леса, ландшафты Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского болотного массива Псковской области (горизонты 0-15 см) (по [24])	<u>17,0-7600,0</u> 710,7 (24)	<u><0,01-70,0</u> 11,97 (51)
Типичная (средняя) тайга, лесные подзолистые почвы, Карелия (горизонты 0-35 см) (по [7])	-	<u><0,01-9,9</u> 0,12 (40)
Степные почвы, юг Ростовской области (горизонты 0-150 см) (по [13])	-	<u><0,01-15,1</u> 0,02 (66)
Примечание. Здесь и далее в таблице 2 в числителе приведены пределы изменения, в знаменателе – средние значения, в скобках – количество измерений, прочерк (-) – опробование не проводилось.		

При выпадении дождя или стекании талых вод по поверхности почв происходит растворение метана, содержащегося в водной и воздушной фазах почв, а также вымывание частиц почвы вместе с сорбированным на них метаном. После чего «захваченный» атмосферными осадками почвенный метан, частично окисляясь, а также выделяясь в атмосферу, может поступать в водные объекты, как напрямую, в составе поверхностного (плоскостного стока), так и после инфильтрации через почвенные горизонты в составе подземного стока. Следует отметить, что не каждый дождь вызывает поверхностный сток. Он появляется лишь тогда, когда интенсивность дождя превышает интенсивность впитывания воды почвой, которая изменяется со временем по мере выпадения дождя и насыщения почвы влагой.

Поскольку сухие почвы тундры, таежно-лесной и степной зон содержат относительно невысокие концентрации метана, то выпавшие на их поверхность и фильтрующиеся через них атмосферные осадки будут незначительно обогащаться метаном, а, следовательно, в малой степени влиять на содержание метана в водных объектах, дренирующих поверхностный и подземный сток. Искусственное орошение почв семиаридных и аридных зон и возможное поступление оросительных вод (главным образом через подземный сток) в прилегающие водные объекты, также не будет оказывать существенного влияния на содержание метана в воде последних. Сказанное подтверждается относительно низкими содержаниями метана в воде дождевых (ливневых) поверхностных и подземных стоков на территориях Карелии и Ростовской области (табл. 2). Так, концентрация метана в грунтовых водах на застроенных территориях и сельскохозяйственных землях юга Ростовской области составляет в среднем 4,0 мкл/л, при этом в 63% проб его концентрация ниже предела обнаружения, а еще в 20% она составляет от 0,5 до 10,0 мкл/л [16]. Эти значения, как правило, существенно меньше концентраций, характерных для водоемов и водотоков Европейской территории России [7; 11; 25 и др.]. Повышенные концентрации газа (до 160,0 мкл/л) зафиксированы в водах неиспользуемых и замусоренных бытовыми отходами колодцев и скважин и связаны, главным образом, с загрязнением грунтовых вод. Характерные для грунтовых вод низкие концентрации метана обусловлены тем, что его основным источником в них является растворение почвенного метана атмосферными осадками, инфильтрующимися через почвенные горизонты. Некоторое, по всей видимости, незначительное количество метана будет поступать в грунто-

вые горизонты вследствие его диффузии и выщелачивания из горных пород, подстилающих водоносные горизонты. Как правило, грунтовые воды содержат кислород в большом количестве, а поэтому непосредственное образование в них метана возможно при антропогенном загрязнении хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами, а также малой скорости горизонтального стока, обусловленной относительно низкими коэффициентами фильтрации водовмещающих пород.

Таблица 2. Концентрация метана в поверхностных и подземных водах, взаимодействующих с почвами

Местоположение точки отбора проб	CH ₄ в воде, мкл/л	CH ₄ в почвах (0-2 см), мкг/г	Визуальная характеристика почв
дождевые (ливневые) поверхностные стоки, г. Петрозаводск	12,0	<0,01	темно-коричневые затопленные ливневыми водами почвы
дождевой поверхностный сток, пойма р. Лососинка, выше г. Петрозаводск	0,1	0,06-0,30	темно-коричневый до черного гумусово-аккумулятивный задернованный горизонт
дождевые (ливневые) поверхностные стоки, г. Ростов-на-Дону	3,5-9,5	-	антропогенные насыпные почвы (чернозем)
талые снеговые воды, г. Ростов-на-Дону	4,2-10,6	-	-
дренажная канава вдоль заболоченного участка леса, о. Соловки	105,3	4,7	темно-коричневые затопленные дренажными водами почвы с большим количеством растительного опада
дренажная канава в районе торфоразработок, Московская область	254,7	<u>1,9-7,4</u> 4,2 (5)	темно-коричневые затопленные дренажными водами почвы; книзу уплотняются, появляется примесь песчаного материала
дренажная канава, Радиловский болотный массив, Псковская область	134,5	-	темно-коричневые затопленные дренажными водами почвы
затапливаемые и размываемые во время прилива почвы, Сорожская губа Онежского залива Белого моря	0,1	0,01	почвы темно-коричневого цвета; цвет морской воды во время прилива коричневый от размыва почв
грунтовые воды юга Ростовской области	<0,1-160,0	-	-

На распаханых территориях, не защищенных какой-либо растительностью (пары), а, следовательно, наиболее подверженных смываемости верхнего горизонта почв, потенциал выноса метана, как растворенного, так и адсорбированного на органоминеральных частицах, с поверхностным стоком выше, чем на нераспаханных землях с естественной растительностью, так как под хорошо развитыми травами смыв почвы, а значит, и вынос метана сокращается в десятки и сотни раз. Однако следует иметь в виду, что распаханность почв улучшает их аэрацию, снижает влажность, тем самым, ухудшаются условия для образования метана, и, как следствие, существенно уменьшается его количество, выносимое с поверхностным стоком. Согласно [28] уплотнение почвы тракторами может уменьшить окисление метана на 50%. В целом, наибольший вынос метана, адсорбированного на органоминеральных почвенных частицах, с поверхностным стоком, вероятно, будет наблюдаться на территориях, сильно расчлененных овражно-балочной сетью, с высоким количеством выпадающих в течение года жидких атмосферных осадков.

Характерный для береговых зон озер, речных пойм и дельт всех природных зон паводковый водный режим, при котором поверхность почвы ежегодно или раз в несколько лет подвергается затоплению паводковыми водами, приводит к активизации образования метана в почвах в период их затопления, и соответственно увеличению вклада почв в формирование уровня содержания метана в водной толще таких участков. При осушении почв в межпаводковые периоды содержание метана в них снижается. Как показывают наблюдения [30], метан интенсивно образуется и выделяется в водную толщу и далее в атмосферу на всех временно затопляемых участках во время половодья или паводков, но после осушения скорость генерации, уровень концентрации и потоки газа снижаются до очень низких значений, а на самых высушенных участках возможен даже возврат к поглощению атмосферного метана. В целом, это типично для всех водных объектов с колебаниями уровня воды [29; 34]. Аналогичная картина наблюдается и на периодически подтопляемых грунтовыми водами территориях [16].

При постоянном или длительном затоплении почв водой (морские и озерные мелководья, речные плавни, водохранилища, пруды и др.) отмечается еще более активная генерация метана затопленными почвами, чем в предыдущем случае [11; 30]. При этом в первые годы после затопления земель, когда в почвах еще имеется большой запас лабильного органического вещества, процессы метанообразования наиболее интенсивны. В то же время, в периодически затопляемых во время приливов почвах и приливной морской воде Сорожской губы Белого моря содержание метана было незначительно и соответственно составляло 0.1 мкл/л и 0.01 мкг/г вл. почвы (см. табл. 2). Низкие концентрации метана в почвах можно объяснить «приливной» эрозией почв, в результате которой обнажаются все более и более древние слои обедненных метаном почв.

Для торфяных залежей характерны максимальные концентрации метана, поэтому можно было бы предположить, что влияние торфяных залежей болот на формирование уровня содержания метана в воде дренирующих их водных объектов будет еще выше, чем при длительном затоплении почв водой. Однако мы считаем, что такие общие для всех болот свойства, как незначительный объем воды, участвующий во внутригодовом влагообороте (несмотря на большие запасы ее в торфяной залежи), и малая водоотдача в межень [20], существенно снижают роль болот в формировании содержания метана в прилегающих водных объектах. Это объясняется тем, что на болотах (особенно верховых) ранней весной поверхностный сток отсутствует; талые воды просачиваются и, достигая уровня грунтовых вод, обогащают болотные воды кислородом, разбавляют их, тем самым, способствуя снижению уровня содержания метана. Воды, поступившие в торфяную залежь, стекают в деятельном (активном) слое в виде фильтрационного потока, скорость горизонтальной фильтрации которого может достигать нескольких десятков и даже сотен метров в сутки [20]. Ручьи, вытекающие из таких болот в весенний период, характеризуются резким подъемом уровня воды, увеличением водности и, как следствие, уменьшением содержания метана, относительно зимнего периода. В летний период, когда наблюдается интенсивное испарение, постепенное истощение запасов свободной воды в деятельном слое приводит к снижению уровня грунтовых вод до инертного слоя (обычно до 0.6-1 м), отличающегося ничтожной проницаемостью и скоростью фильтрации (максимум 6 м/год), в результате чего сток с верховых болот практически прекращается. Низкий сток характерен и для зимней межени [20], причем зимой, даже при наличии свободной воды в деятельном слое в связи с его промерзанием, болота могут вообще не давать стока. Таким образом, несмотря на повышенные концентрации метана, низкая водоотдача торфяных залежей, по всей видимости, существенно снижает роль болот в формировании уровня содержания метана в воде дренирующих их водных объектов. При разработке торфяных залежей, в результате водной эрозии оторфованных и торфяных почв,

а также в целом при осушении болота дренажными канавами будет наблюдаться повышенный вынос метана в прилегающие водные объекты. Это подтверждается результатами определения метана в осушительных дренажных канавах, проложенных вдоль заболоченных участков леса и болотных массивов (см. табл. 2), а также в канаве, дренирующей поверхностный и подземный сток в осушительный пруд в районе торфоразработок (Московская область, заповедник «Журавлиная родина»).

Известно, что водная эрозия имеет широкое распространение и проявляется практически во всех природных зонах, где имеются уклоны более 1.5° , за исключением полупустынной и пустынной зон с небольшим количеством осадков и малоснежными зимами. Расчеты влияния водной эрозии на почвы мира показали [14], что с обрабатываемых полей смывается ежегодно не менее 90 млрд. тонн почвы. Данная величина почти в 5 раз выше твердого стока рек мира, который оценивается в 19.3 млрд. тонн в год (по [4]). Такое различие в значениях объясняется тем, что далеко не весь рыхлый материал, образующийся вследствие эрозии пахотных почв, достигает больших рек и океана. Преимущественная часть его отлагается ниже по склону и в гидрографической сети первого порядка. Например, в бассейне р. Ока распределение отложенных наносов по элементам рельефа выглядит следующим образом: в пределах склонов – 60%; в долинах без постоянного стока – 20%; в долинах малых рек – 10%; в долинах средних рек и главной реки – 10% [14], таким образом, речных долин с постоянным стоком достигает 20% смытых почв.

На основе последнего значения проведем ориентировочный расчет глобального количества метана, которое может поступить в водные объекты при смыве почв атмосферными осадками. Примем, что из 90 млрд. тонн почв, ежегодно смываемых с полей при водной эрозии (по [14]), в водные объекты поступает 20%, то есть 18 млрд. тонн, что практически соответствует величине твердого стока рек мира, оцениваемого в 19.3 млрд. тонн в год (по [4]). Если расчет провести по медианному значению содержания метана (0.04 мкг/г) в эродированном верхнем слое почв, то объем поступающего в водные объекты вместе со смываемыми почвами метана составит 720 тонн/год (или 1029 тыс. м³/год). При расчете по среднеарифметическому значению (0.18 мкг/г) объем метана, поступающего в водные объекты вместе с почвами, будет равняться 3240 тонн/год (или 4629 тыс. м³/год). Полученные ориентировочные величины годового количества метана, выносимого вместе со смываемыми почвами, невелики, и составляют всего от 0.3 до 1.1% от количества метана, окисляемого в водной толще Мирового океана в течение одних суток [12]. При этом, как отмечено ранее, часть этого метана, прежде чем попасть в водные объекты, окисляется, а часть выделяется в атмосферу, то есть в водные объекты поступает еще меньше метана.

Выводы

Влияние почвенного покрова на формирование содержания метана в поверхностных водах суши проявляется при вымывании метана из почв атмосферными осадками и талыми водами, и последующем поступлении в водные объекты, как напрямую, в составе поверхностного стока, так и после инфильтрации через почву в составе подземного стока.

Влияние сухих (не заболоченных) почв на формирование содержания метана в воде водных экосистем несущественно, и напрямую не оказывает какого-либо заметного воздействия на его распределение и динамику в них. Роль почв повышается на переувлажненных (заболоченных) территориях, но в целом даже здесь их влияние на содержание метана в воде прилегающих водных объектов будет носить подчиненный характер. Более заметное влияние почв на концентрацию метана в воде водных объектов наблюдается при затоплении почв

в ходе наводнений или подтопления территорий, а также в результате заполнения водой ложа водохранилищ, прудов и других искусственных сооружений.

Выполненная ориентировочная оценка глобального выноса почвенного метана в водные экосистемы вместе с плоскостным стоком показала, что его величина незначительна и варьирует в пределах от 720 до 3240 тонн в год.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гос. задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляева Н.И. Роль черноземов в регулировании эмиссии метана на газоносной территории: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Москва, 2007. – 24 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. Бримблкумб П. Состав и химия атмосферы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 352 с.
4. Васильев В.П. Твердый речной сток в Мировой океан // Литология и полезные ископаемые. – 1987. – № 6. – С. 19–28.
5. 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.
6. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в воде рек Европейской территории России: особенности распределения и районирование // Материалы ежегодной Междунар. научн.-практ. Конф. LXV Герценовские чтения «География: проблемы науки и образования». – Санкт-Петербург: Астерион, 2012. – С. 114–116.
7. 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.
8. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Глобальный сток метана в составе атмосферных осадков и его влияние на формирование концентраций метана в водных экосистемах // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9 (51). – С. 16–20.
9. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан в почвах различных географических зон России // Известия РАН. Серия географическая. – 2018. – № 3. – С. 47–55.
10. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки. – 2013. – № 6. – С. 78–82.
11. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 450–455.
12. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 6. – С. 48–58.
13. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Эмиссия метана из почв Ростовской области // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17. – № 4(49). – С. 44–52.
14. Голубев Г.Н. Геоэкология: Учебник для студентов ВУЗов. 2-е изд. испр. и доп. – Москва: Аспект Пресс, 2006. – 288 с.

15. Можарова Н.В. Функционирование и формирование почв над подземными хранилищами природного газа: автореф. дис. ... доктора биол. наук. – Москва, 2009. – 48 с.
16. Никаноров А.М., Гарькуша Д.Н., Зубков Е.А., Барцев О.Б., Минина Л.И. Гидрохимический режим и качество грунтовых вод застроенных территорий юга Ростовской области // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. – № 2. – С. 171–178.
17. Ножевникова А.Н. Мусорные залежи – “метановые бомбы” планеты // Природа. – 1995. – № 6. – С. 25–34.
18. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. – Ростов-на-Дону: ФГБУ “Гидрохимический институт”, 2013. – 19 с.
19. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. – Ростов-на-Дону: ФГБУ “Гидрохимический институт”, 2012. – 23 с.
20. Соломенцев Н.А., Львов А.М., Симиренко С.Л., Чекмарев В.А. Гидрология суши. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. – 432 с.
21. Степанов А.Л. Образование и поглощение парниковых газов в почвах // В кн.: Почвы в биосфере и жизни человека. – Москва: Московский государственный университет, 2012. – С. 118–134.
22. Сухоруков В.В., Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Автомобильный транспорт как фактор воздействия на баланс метана в атмосфере Ростовской области // Материалы II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы наук о Земле». – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 216–218.
23. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Хромов М.И. Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // Известия Русского географического общества. – 2008. – Т. 140. – Вып. 5. – С. 40–48.
24. Фёдоров 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.
25. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону; Москва: ЗАО «Ростиздат», 2007. – 330 с.
26. Methane in surface waters of Oregon estuaries and rivers / M.A. Angelis, M.D. Lilley // *Limnol. Oceanogr.* – 1987. – V. 32. – № 3. – P. 716–722.
27. Re-appraisal of the fossil methane budget and related emission from geologic sources / G. Etiope, K.R. Lassey, R. Klusman, E. Boschi // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – V. 35. – P. 1–5.
28. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic / S. Hansen, J.E. Maehlum, L.R. Bakken // *Soil Biol Biochem.* – 1993. – V. 25. – P. 621–630.
29. Methane flux in the Great Dismal Swamp / R.C. Harriss, D.I. Sebacher, F.P. Day // *Nature*. – 1982. – Vol. 297. – P. 673–674.
30. Methane (CH₄) release from littoral wetlands of boreal lakes during an extended flooding period / S. Juutinen, J. Alm, T. Larmola, J.T. Huttunen, M. Morero, S. Saarnio, P.J. Martikainen, J. Silvola // *Global Change Biology*. – 2003. – V. 9. – P. 413–424.
31. Seasonal variation in methane fluxes from sedimentary basins to the atmosphere: Results from chamber measurements and modeling of transport from deep sources / R. Klusman, M. Leopold, M. LeRoy // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – V. 105D. – P. 24661–24670.

32. Gaia's breath – Global methane exhalations / K.A. Kvenvolden, B.W. Rogers // *Marine and Petroleum Geology*. – 2005. – V. 22. – № 4. – P. 579–590.

33. The atmospheric cycling of radiomethane and the “fossil fraction” of the methane source / K.R. Lassey, D.C. Lowe, A.M. Smith // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2007. – Vol. 7. – № 8. – P. 2141–2149.

34. Methane emissions from the Orinoco River floodplain, Venezuela / L.K. Smith, M.W. Lewis, J.P. Chanton, G. Cronin, S.K. Hamilton // *Biogeochemistry*. – 2000. – V. 51. – P. 113–140.

REFERENCES

1. Belyaeva N.I. *Rol' chernozemov v regulirovanii emissii metana na gazonosnoj territorii*. Avtoreferat kand. nauk [The role of chernozems in regulating methane emissions in the gas-bearing territory. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2007. 24 p.

2. Berestovskaya Yu.Yu., Rusanov I.I., Vasil'yeva L.V., Pimenov N.V. Processes of methane formation and oxidation in the soils of the polar tundra of Russia. *Microbiology*, 2005, vol. 74, no. 2, pp. 261–270. In Rus.

3. Brimblecombe P. *Sostav i himiya atmosfery* [Composition and chemistry of the atmosphere]. Moscow, Mir Publ., 1998. 352 p.

4. Vasil'iev V.P. Solid river runoff in the World Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 1987, no. 6, pp. 19–28. In Rus.

5. Gal'chenko V.F., Dulov L.E., Kramer B., Konova N.I., Barysheva S.V. Biogeochemical processes of the methane cycle in soils, swamps and lakes of Western Siberia. *Microbiology*, 2001, vol. 70, no. 2, pp. 215–225. In Rus.

6. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Metan v vode rek Evropejskoj territorii Rossii: osobennosti raspredeleniya i rajonirovanie [Methane in the water of the rivers of the European territory of Russia: features of distribution and zoning]. *Materialy ezhegodnoj Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf LXV Gercenovskie chteniya «Geografiya: problemy nauki i obrazovaniya»* [Proceedings of the annual International Scientific-Practical Conference LXV Herzen Readings «Geography: problems of science and education»]. St. Petersburg, Asterion Publ., 2012. pp. 114–116.

7. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Features of the distribution of methane content in the coastal areas of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 288–297. In Rus.

8. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Global'nyj stok metana v sostave atmosferyh osadkov i ego vliyanie na formirovanie koncentracij metana v vodnyh ekosistemah [Global flow of methane in the composition of atmospheric precipitation and its influence on the formation of methane concentrations in aquatic ecosystems]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2016, no. 9(51), pp. 16–20.

9. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambiev N.S. Methane in soils of different geographical zones of Russia. *Regional Research of Russia*, 2018, no. 3, pp. 47–55. In Rus.

10. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Metan kak indikator uslovij rannego diagenesa i ekologicheskogo sostoyaniya vodnyh ekosistem [Methane as an indicator of the conditions of early diagenesis and the ecological state of aquatic ecosystems]. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskij region. Seriya Estestvennye nauki*, 2013, no. 6, pp. 78–82. In Rus.

11. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti raspredeleniya sodержaniya metana v vodohranilishchah [Spatio-temporal regularities of the distribution of methane content in reservoirs]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, vol. 10, issue 1, pp. 450–455.

12. Gar'kusha D. N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Calculation of methane balance elements in water ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean on the basis of empirical formulas. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, no. 6, pp. 48–58. In Rus.
13. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Methane emission from the soils of the Rostov region. *Arid Ecosystems*, 2011, vol. 17, no. 4 (49), pp. 44–52. In Rus.
14. Golubev G.N. *Geoekologiya*. Uchebnik dlya studentov VUZov. 2-e izd. ispr. i dop. [Geoecology. Textbook for university students. 2nd ed. Rev. and extra]. Moscow, Aspect Press Publ., 2006. 288 p.
15. Mozharova N.V. *Funkcionirovanie i formirovanie pochv nad podzemnymi hranilishchami prirodnogo gaza* Avtoreferat doct. nauk [Functioning and formation of soils over underground natural gas storage facilities. Doct. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 48 p.
16. Nikanorov A.M., Gar'kusha D.N., Zubkov E.A., Bartsev O.B., Minina L.I. Hydrochemical regime and quality of ground waters of the built-up territories of the south of the Rostov region. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 171–178. In Rus.
17. Nozhevnikova A.N. Musornye zalezhi – “metanovye bomby” planety [Garbage deposits – "methane bombs" of the planet]. *Priroda*, 1995, no. 6, pp. 25–34.
18. RD 52.24.511-2013. *Massovaya dolya metana v donnyh otlozheniyah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem analiza ravnovesnogo para* [Guidance document 52.24.511-2013. The mass fraction of methane in the bottom sediments. Gas chromatographic method of measurement using the analysis of the equilibrium vapor]. Rostov-on-Don, "Hydrochemical Institute" Publ., 2013. 19 p.
19. RD 52.24.512-2012. *Ob'emnaya koncentraciya metana v vodah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem analiza ravnovesnogo para* [Guidance document 52.24.512-2012. Volume concentration of methane in the water. Gas chromatographic method of measurement using the analysis of the equilibrium vapor]. Rostov-on-Don, "Hydrochemical Institute" Publ., 2012. 23 p.
20. Solomentsev N.A., L'vov A.M., Simirenko S.L., Chekmarev V.A. *Gidrologiya sushi* [Land hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 432 p.
21. Stepanov A.L. Obrazovanie i pogloshchenie parnikovyykh gazov v pochvah [Formation and absorption of greenhouse gases in soils]. *V knige: Pochvy v biosfere i zhizni cheloveka* [In: Soils in the biosphere and human life]. Moscow, Moscow State University, 2012. pp. 118–134.
22. Sukhorukov V.V., Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Avtomobil'nyj transport kak faktor vozdeystviya na balans metana v atmosfere Rostovskoj oblasti [Automobile transport as a factor of influence on the methane balance in the atmosphere of the Rostov region]. *Materialy II nauchnoj konferencii studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy nauk o Zemle»* [II Scientific conference of students and young scientists with international participation "Actual problems of Earth sciences"]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016. pp. 216–218.
23. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Khromov M.I. Emissiya metana s torfyanykh zalezhej Ilasskogo bolotnogo massiva Arhangel'skoj oblasti [Methane emission from peat deposits of the Ilass marsh massif of the Arkhangelsk region]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2008, vol. 140, issue 5, pp. 40–48.
24. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission by peat deposits of upper bogs of the Pskov region. *Geography and Natural Resources*, 2015, no. 1, pp. 88–97. In Rus.
25. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemah*. 2-e izd., pererab. i dop. [Methane in water ecosystems. 2nd ed., reprint]. Rostov-on-Don; Moscow, ZAO "Rostizdat" Publ., 2007. 330 p.

26. Angelis M.A., Lilley M.D. Methane in surface waters of Oregon estuaries and rivers. *Limnology and Oceanography*, 1987, vol. 32, no. 3, pp. 716–722. doi: 10.4319/lo.1987.32.3.0716
27. Etiope G., Lassey K.R., Klusman R., Boschi E. Re-appraisal of the fossil methane budget and related emission from geologic sources. *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35, pp. 1–5.
28. Hansen S., Maehlum J.E., Bakken L.R. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, vol. 25, no. 5, pp. 621–630. doi: 10.1016/0038-0717(93)90202-M
29. Harriss R.C., Sebacher D.I., Day F.P. Methane flux in the Great Dismal Swamp, *Nature*, 1982, vol. 297, pp. 673–674.
30. Juutinen S., Alm J., Larmola T., Huttunen J.T., Morero M., Saarnio S., Martikainen P.J., Silvola J. Methane (CH₄) release from littoral wetlands of boreal lakes during an extended flooding period. *Global Change Biology*, 2003, vol. 9, pp. 413–424.
31. Klusman R., Leopold M., LeRoy M. Seasonal variation in methane fluxes from sedimentary basins to the atmosphere: Results from chamber measurements and modeling of transport from deep sources. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105D, pp. 24661–24670.
32. Kvenvolden K.A., Rogers B.W. Gaia's breath – Global methane exhalations. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, vol. 22, no. 4, pp. 579–590.
33. Lassey K.R., Lowe D.C., Smith A.M. The atmospheric cycling of radiomethane and the “fossil fraction” of the methane source. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, vol. 7, no 8, pp. 2141–2149.
34. Smith L.K., Lewis M.W., Chanton J.P., Cronin G., Hamilton S.K. Methane emissions from the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 51, pp. 113–140.

Сведения об авторах:

Гарькуша Дмитрий Николаевич, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. П. Зорге, 40. E-mail: gardim1@yandex.ru

Dmitry N. Gar'kusha, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, 40 R. Sorge str., Rostov-on-Don, 344090, Russia. E-mail: gardim1@yandex.ru

Трубник Роман Геннадьевич, младший научный сотрудник, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. П. Зорге, 40. E-mail: trubnikroman@outlook.com

Roman G. Trubnik, Junior Researcher, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, 40 R. Sorge str., Rostov-on-Don, 344090, Russia. E-mail: trubnikroman@outlook.com

Дмитрик Леонид Юрьевич, младший научный сотрудник, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. П. Зорге, 40. E-mail: dimikarmy13@inbox.ru

Leonid Yu. Dmitrik, Junior Researcher, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, 40 R. Sorge str., Rostov-on-Don, 344090, Russia. E-mail: dimikarmy13@inbox.ru