

С.А. КУЛАЧКОВА, Я.И. ЛЕБЕДЬ-ШАРЛЕВИЧ,  
Н.В. МОЖАРОВА, А.М. НИКОЛАЕВА

## РОЛЬ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

В РЕГУЛИРОВАНИИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ

**Кулачкова Светлана Александровна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, тел.: +7 (916) 488-90-77

E-mail: kulachkova\_sa@inbox.ru

**Лебедь-Шарлевич Яна Ивановна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУ «ЦСП» Минздрава России; Российская Федерация, 119121, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (916) 580-26-43

E-mail: yana.l-sh@mail.ru

**Можарова Надежда Васильевна**, доктор биологических наук (в прошлом: доцент факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова); Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12.

E-mail: nvm47@list.ru

**Николаева Анна Михайловна**, исполняющий обязанности младшего научного сотрудника ФГБУ «ИГКЭ» (Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля); Российская Федерация, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 206, тел.: +7 (926) 469-74-80

E-mail: amnik21@yandex.ru

Статья посвящена актуальным вопросам эмиссии парниковых газов в атмосферу в городской среде и выявлению роли почв в регулировании этого процесса. Исследовано три типа потенциально газогенерирующих объектов: территории над погребенными стихийными свалочными телами, участки строительства на засыпанной переувлажненной речной пойме и рекультивированные поля фильтрации сточных вод. На каждом объекте определялись типы доминирующих почв, их физические, химические свойства, способность образовывать и окислять метан, продуцировать углекислый газ. Показано, что более развитые урбисерогумусовые техногенные почвы и урбаноземы техногенные, а также созданные в ходе благоустройства реплантоземы эффективнее утилизируют аллохтонные потоки метана, чем литостраты, органолитостраты и слабо развитые почвы. Эмиссии метана в атмосферу из первой группы почв не наблюдается, но они служат более мощным источником углекислого газа по сравнению с литостратами и органолитостратами. Запечатывание, переуплотнение, засоление, подтопление городских почв снижают их окислительную способность и повышают вероятность эмиссии метана в атмосферу.

В связи с ростом индустриализации города приобретают больший вес в естественном круговороте веществ в природе. Города являются источниками парниковых газов, выделяемых промышленностью, автотранспортом, полигонами ТБО, а также городскими почвами. Вследствие увеличения плотности населения застраивается все больше территорий с неблагоприятными свойствами: переувлажненные поймы рек, засыпанные овраги и балки, погребенные несанкционированные свалки, рекультивированные поля фильтрации. Городские почвы над такими территориями являются источником и стоком метана и углекислого газа. Данное исследование важно для понимания вклада городских почв в выбросы парниковых газов в атмосферу.

**Практическая польза:** Полученные результаты могут быть задействованы при разработке более рациональных рекомендаций по рекультивации потенциально опасных в газогеохимическом отношении территорий, используемых под строительство.

**Ключевые слова:** метан; углекислый газ (диоксид углерода); насыпные грунты; биогаз; эмиссия парниковых газов; функционирование городских почв

**Цитирование:** Кулачкова С.А., Лебедь-Шарлевич Я.И., Можарова Н.В., Николаева А.М. (2018) Роль городских почв в регулировании эмиссии парниковых газов в атмосферу // Городские исследования и практики. Т. 3. № 3. С. 48–68. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp33201848-68>

## Введение

Проблеме увеличения содержания метана и углекислого газа в атмосфере в настоящее время уделяется большое внимание, так как с ними связывают глобальное потепление климата на планете, обусловленное «парниковым эффектом». Известно, что по сравнению с доиндустриальным периодом в настоящее время концентрация углекислого газа в атмосфере выросла на 40% (с 278 до 395 ppm), метана — на 150% (с 0,714 до 1,813 ppm) [*Carbon and other biogeochemical cycles, 2013*]. Среди парниковых газов атмосферы метан и углекислый газ занимают ведущее место, их суммарные выбросы составляют 91% от всех парниковых газов. При этом метана выбрасывается значительно меньше (всего 14% от всех парниковых газов), но он активнее углекислого газа в 25 раз.

Однако существует еще одна важная проблема, которой практически не уделяется внимания в России: это токсикологическая опасность  $\text{CO}_2$ . Увеличение концентрации углекислого газа, по некоторым данным, оказывает негативное влияние на здоровье человека. По мнению зарубежных ученых, длительное нахождение человека в среде с содержанием углекислого газа в атмосфере выше 0,08% приводит к развитию широкого спектра заболеваний: от головных болей и учащенного пульса до ацидоза и других изменений в организме [Robertson, 2006]. В связи с этим за рубежом приняты стандарты для помещений — 1000 ppm. Метан считается токсичным только в очень больших концентрациях, но с его накоплением в грунтах связана потенциальная пожаро- и взрывоопасность возводимых на них объектов. Указанные обстоятельства приобретают особую важность в городах, где плотность населения и застройки велика и постоянно приумножается.

Города занимают важное место среди источников парниковых газов. На их долю, по разным оценкам, приходится от 30–40 до 75–80% всех антропогенных выбросов в атмосферу (от предприятий энергетики и промышленности, находящихся в городах, транспорта, жилых и коммерческих зданий, отходов и сточных вод, изменения землепользования) [Satterthwaite, 2008]. Максимальное количество метана попадает в атмосферу городов из полигонов твердых бытовых отходов (ТБО), очистных сооружений и предприятий газоснабжения. Выделение углекислого газа преимущественно связано с выбросами промышленных, в том числе энергетических предприятий, и автотранспорта. Эмиссия парниковых газов из вышеназванных источников регулярно учитывается в кадастрах антропогенных выбросов [Национальный доклад..., 2006]. В Москве эмиссии парниковых газов в атмосферу в основном связаны с их технологическими выбросами при сжигании топлива на стационарных источниках (73%), транспортом (21%) и промышленностью (около 5%) [Доклад..., 2015]. Активно разрабатываются и принимаются меры по снижению выбросов парниковых газов из перечисленных выше источников путем внедрения энергосберегающих технологий и технологий так называемого зеленого строительства. Но существует антропогенно-природный источник, вклад которого в кадастрах не учтен. Это городские почвы. Почвы выполняют множество экологических функций в городских экосистемах, одна из них — газовая функция, регулирующая состав приземной атмосферы. Они могут выступать как источником (генератором), так и стоком (поглотителем) различных газов [Добровольский, Никитин, 1986]. Это зависит от химических и физических свойств почв.

Рост городов приводит к застройке неблагоприятных территорий: бывших промышленных зон, засыпанных оврагов с несанкционированными свалками, бывших полей фильтрации сточных вод, засыпанных болот и речных пойм с органогенными отложениями. Все эти объекты могут быть опасны в газогеохимическом отношении, что обусловлено возможностью образования биогаза, состоящего в основном из метана и углекислого газа. По нашим данным, городские почвы, сформированные на техногенных отложениях, часто содержащих строительно-бытовые отходы и другие источники органического вещества, могут оказывать значительное влияние на состав атмосферы и должны оцениваться в кадастрах антропогенных выбросов парниковых газов в секторах «отходы» и «землепользование» [Можарова и др., 2018]. В литературе тоже существуют сведения о недооценке роли городских почв в эмиссии парниковых газов, и этот вопрос является актуальным для исследования. С.М. Децина с соавторами [Decina et al., 2016] выявили, что в селитебных зонах Бостона поток углекислого газа в атмосферу от дыхания почв составляет 72% от выброса  $\text{CO}_2$  автотранспортом. Почвы газонов 50-летнего возраста в ботаническом саду в Мельбурне иногда могут выступать источниками метана (1–4 мкг  $\text{C}/\text{м}^2$  в час), хотя, как правило, в теплый период они осуществляют сток

(поглощение) атмосферного метана [Livesley et al., 2010]. Актуальность настоящего исследования обусловлена недостатком данных, оценивающих городские почвы как источники и стоки парниковых газов.

Цель исследования — выявить роль разных типов городских почв в эмиссии метана и углекислого газа в атмосферу.

Задачи исследования:

1. Установить особенности образования, поглощения и эмиссии метана и углекислого газа в городских почвах на территориях с потенциально возможной газогенерацией:
  - а) над погребенными стихийными свалочными телами;
  - б) на засыпанных поймах рек с погребенными органогенными отложениями;
  - в) на рекультивированных полях фильтрации сточных вод.
2. Выявить общие закономерности в функционировании городских почв исследованных объектов, обуславливающие снижение или увеличение эмиссии парниковых газов в атмосферу.

В работе обобщены материалы за 10-летний период исследований, получены новые для Москвы результаты по образованию, поглощению и эмиссии метана и углекислого газа различными почвами и почвоподобными образованиями.

### Объекты и методы исследований

Объектами исследования выступали городские почвы и техногенные поверхностные образования (ТПО)<sup>1</sup> на территориях с потенциальным источником газогенерации. Таким источником были техногенно-рекрементогенные отложения (грунты, содержащие строительный и бытовой мусор, различные отходы, бумагу, текстильные материалы и проч.), органогенные природные отложения (торфяные) и остатки илов сточных вод в толще насыпных грунтов, сформированных при строительстве. Соответственно, исследовались три типа участков. Первый тип — это участки над погребенными стихийными свалочными телами на территории правобережья Москвы-реки, которые либо застраивались в момент исследования, либо были застроены много лет назад. В летний период года в сходных погодных условиях исследовано 17 участков (рис. 1) с грунтами разной степени газогеохимической опасности согласно карте стихийных свалочных тел [Экологический атлас Москвы, 2000]. Большая их часть по содержанию компонентов биогаза относилась к потенциально опасным ( $\text{CH}_4$  0,1–1%,  $\text{CO}_2$  0,5–10%), но также выделялись опасные ( $\text{CH}_4$  1–5%,  $\text{CO}_2$  0,5–10%) и пожароопасные ( $\text{CH}_4$  > 5%,  $\text{CO}_2$  > 10%). На каждом участке закладывался один характерный почвенный разрез и 3–7 точек для определения эмиссии газов с поверхности почв и отбора проб почвенного воздуха и образцов техногенных горизонтов с глубины 60 см. Второй тип исследованных участков — это засыпанная территория поймы Москвы-реки (Красногорск, Московская область), застроенная жилыми микрорайонами (98 точек опробования в теплый период года, при среднесуточной температуре воздуха выше +10 °C). Третий тип — это рекультивированные Люберецкие поля фильтрации сточных вод (ныне московский район Некрасовка), на которых также возводятся многоэтажные дома (110 точек опробования в разные сезоны года).

Основным методологическим подходом было изучение статической составляющей почв (определение физических и химических свойств почв) параллельно с их функционированием (образованием, поглощением и выделением метана и углекислого газа). pH определялся в водной почвенной суспензии потенциометрическим методом, содержание органического углерода — методом Тюрина с фотометрическим окончанием [Теория и практика..., 2006]. Eh измерялся в профиле почв мультифункциональным прибором HI 8314 (pH/mV/°C метр, Hanna Instruments, Germany). Содержание метана и углекислого газа определялось с помощью инертного пробоотборника в профиле почв и ТПО (на глубинах 5–10, 30 и 60 см), а также в устье геологических скважин (на некоторых объектах над погребенными стихийными сва-

1 Почвы — это природные естественно-исторические образования, состоящие из серии генетически связанных горизонтов, а ТПО, согласно Классификации и диагностике почв России (2004), — «целенаправленно сконструированные почвоподобные тела, а также остаточные продукты хозяйственной деятельности, состоящие из природного и/или специфического новообразованного субстрата», без генетической связи между горизонтами. Но, согласно закону г. Москвы «О городских почвах» № 31 от 4.06.2007, ТПО также можно относить к почвам города, так как они выполняют экологические функции почв.

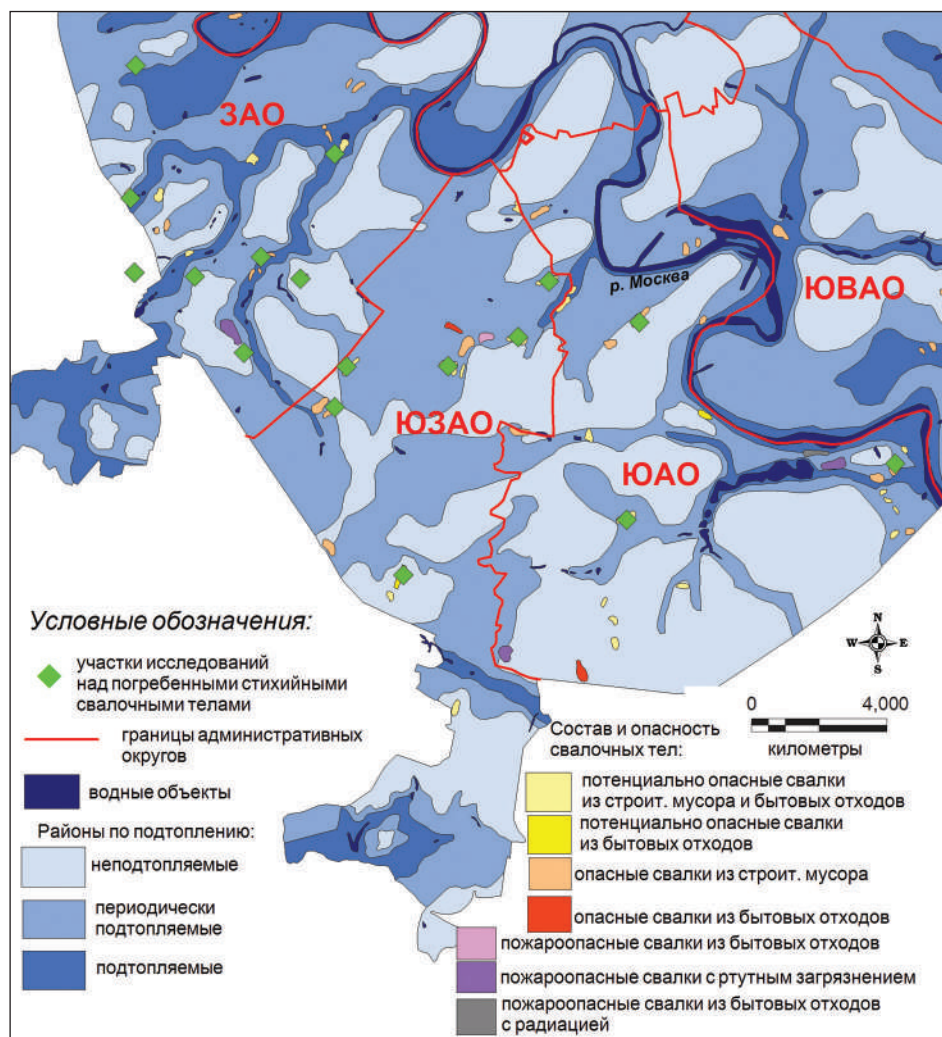


Рис. 1. Картограмма размещения участков исследования над стихийными свалочными телами

Источник: информация взята из «Экологического атласа Москвы» [2000].

лочными телами) с последующим анализом в лаборатории. Эмиссия метана и углекислого газа устанавливалась статическим камерным методом [Полевые и лабораторные методы..., 2001]. Концентрация метана и углекислого газа определялась на газовом хроматографе (модель «Кристаллюкс 4000М») с точностью 0,1 ppm ( $10^{-5}\%$ ). Потенциальные активности бактериального образования и окисления метана почвами установлены кинетическим методом с инкубированием образцов почв в закрытых флаконах по выделению или поглощению метана соответственно [Методы почвенной микробиологии..., 1991]. Статистическая обработка данных проводилась в программах StatSoft Statistica 10.5 и MS Office Excel. В работе использованы крупномасштабные материалы топографического, геологического и гидрогеологического обследования грунтов для части ключевых участков (ООО НПЦ «Экостройгеология»).

#### Почвы и ТПО районов исследования

В ходе строительства в верхней толще насыпных грунтов, используемых для засыпки котлованов, формируются такие ТПО, как литостраты и органолитостраты (рис. 2). Названия ТПО даны по «Классификации и диагностике почв России» [2004]. Литостраты представляют собой насыпные минеральные грунты (техногенные горизонты ТСН) различного гранулометрического состава (песчаного, суглинистого, глинистого). Они характеризуются высокой плот-



ностью ( $1,5-1,8 \text{ г/см}^3$ ), глыбистой структурой или бесструктурностью, низким содержанием органического углерода (меньше 1%), нейтральной, слабощелочной или щелочной реакцией среды ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} 7,0-9,0$ ). Органолитостраты отличаются от литостратов наличием несортированного органоминерального материала, встречающегося в виде прослоев или формирующего профиль целиком. Содержание органического углерода в исследованных нами органолитостратах варьировало от 1 до 4%.

При благоустройстве территорий после строительства и создании газонов формируются реплантоземы — ТПО с рекультивационным компостно-гумусовым или торфяным горизонтом (RAT), насыпанным на техногенный материал литостратов и органолитостратов. Содержание органического углерода в этих горизонтах составляло 3–8%. С течением времени происходит интенсивная минерализация торфокомпостного материала. ТПО трансформируются в урбисерогумусовые техногенные почвы. Под этим названием нами описаны молодые городские почвы, профиль которых состоит из двух основных горизонтов: урбисерогумусового (AYur) и техногенного (TCH). Урбисерогумусовый — органоминеральный светло-серый гумусированный горизонт мощностью 5–10 см с комковатой структурой,  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} 6,5-7,7$ , содержанием органического углерода 2,0–3,8%, включением кирпича, стекла и других городских артефактов, без признаков слоистости. При более длительном воздействии факторов городского почвообразования формируются урбаноземы техногенные (рис. 2). Подробная характеристика почвенного горизонта урбик (UR) приведена в работе Т.В. Прокофьевой с соавторами [2014]. Урбаноземы характеризуются слоистостью, обусловленной постоянным привнесением различных субстратов на поверхность почв. Исследованные нами урбаноземы маломощные сформированы на техногенных отложениях. Водно-физические свойства урбиковых горизонтов улучшаются по сравнению с техногенными,  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} 7,2-8,2$ , содержание органического углерода меньше, чем в рекультивационных горизонтах, — 1,0–2,8%.

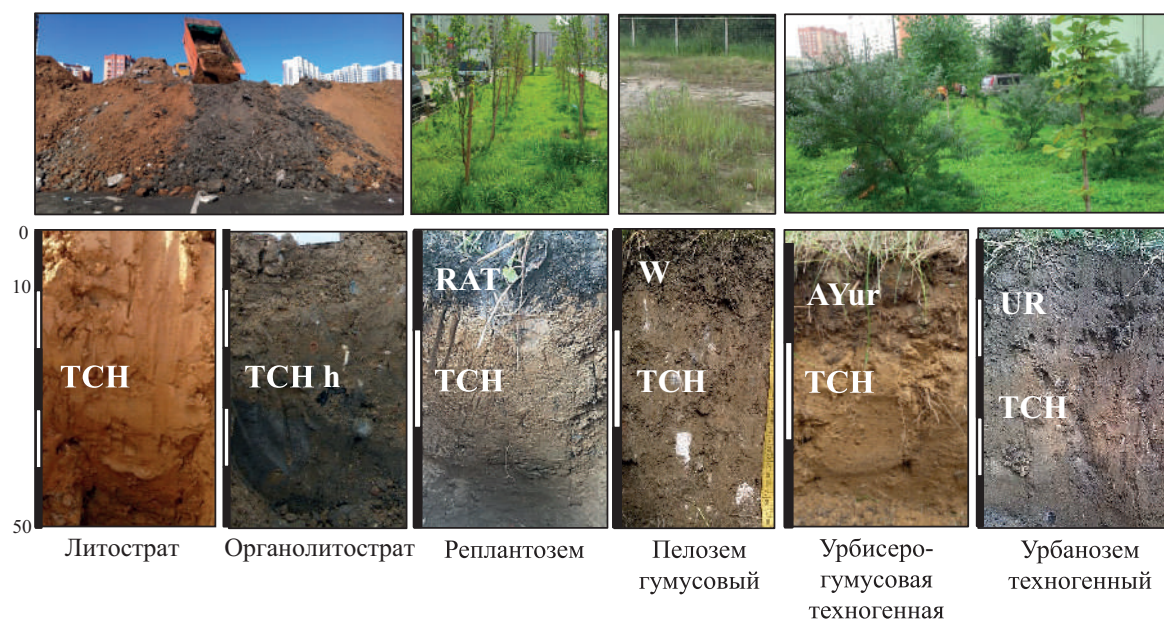


Фото © Светлана Кулачкова, Яна Лебедь-Шарлевич

Рис. 2. Основные типы изученных почв и ТПО застраиваемых территорий и жилых микрорайонов Москвы

В случае если подсыпка рекультивационного горизонта не осуществляется и происходит естественное зарастание литостратов и органолитостратов, то вместо реплантоземов формируются слаборазвитые почвы: на суглинках — пелоземы гумусовые, на песках — псаммоземы гумусовые с очень маломощными поверхностными дерновыми (W) горизонтами (названия почв согласно «Классификации и диагностике почв России [2004]).

### Концепция образования и поглощения парниковых газов в насыпных грунтах и почвах в городских условиях

В процессе разложения органического вещества в техногенных и техногенно-рекрементонных грунтах, в природных органогенных отложениях образуются углекислый газ и метан. Как известно, в аэробных условиях доминирует углекислый газ, после исчерпания кислорода в анаэробных условиях при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала в больших количествах накапливается метан. Образование биогаза продолжается в течение 10 и более лет. Сплошные слои газогенерирующих субстратов обычно погребены на некоторой глубине, в толще насыпных грунтов присутствуют локальные очаги газогенерации в виде скоплений строительно-бытового мусора и других органических включений (рис. 3). Образовавшиеся газы диффузионными и конвективными потоками перемещаются к поверхности. При этом часть их поглощается грунтовой толщей в результате процессов сорбции и растворения в воде. Это в большей степени имеет значение для углекислого газа, тогда как метан очень слабо растворяется в воде и адсорбируется твердой фазой [Смагин, 2005]. Основной механизм утилизации метана — это окисление специфической группой микроорганизмов — метанотрофными бактериями [Гальченко, 2001], которое начинается уже в толще грунтов, но максимально эффективно протекает в почвах.

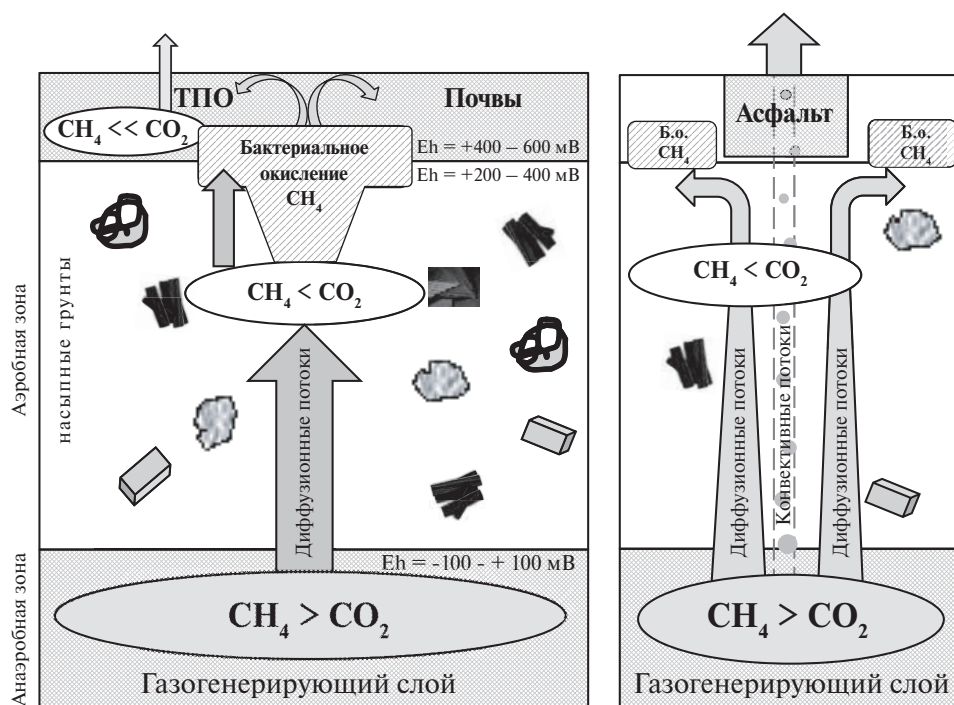


Рис. 3. Концептуальная схема образования и поглощения парниковых газов в насыпных грунтах и почвах в городских условиях

Источник: схема сделана авторами статьи.

Метаногенез — распространенный в природе процесс. Максимально интенсивно автохтонный (собственно почвенный) метан образуется в переувлажненных почвах. Но и в сухих (автоморфных) почвах внутри почвенных агрегатов, в центрах которых формируются восстановительные условия, продуцируется метан [Степанов, Манучарова, 2006]. Образовавшийся в газогенерирующих отложениях и привнесенный в почву аллохтонный метан, а также собственный автохтонный метан окисляются метанотрофными бактериями. От того, насколько благоприятные условия для этого процесса складываются в почвах и ТПО, будет зависеть полнота окисления и отсутствие или, наоборот, проявление эмиссии метана в атмосферу.

Бактериальное окисление метана ограничивают следующие факторы: низкий окислительно-восстановительный потенциал при недостатке кислорода (наблюдается при переувлажнении, переуплотнении, запечатывании асфальтобетонными покрытиями), хотя в последнее время известны работы по анаэробному окислению метана, но доля его мала [Serrano-Silva et al., 2014]; загрязнение легкорастворимыми солями (в городских почвах наблюдается при использовании противогололедных реагентов); высокая скорость газовых потоков. Наиболее полно бактерии ассимилируют медленные, диффузионные потоки метана, их они способны перехватить полностью, тогда как конвективные быстрые потоки устремляются в атмосферу [Заварзин, 1997].

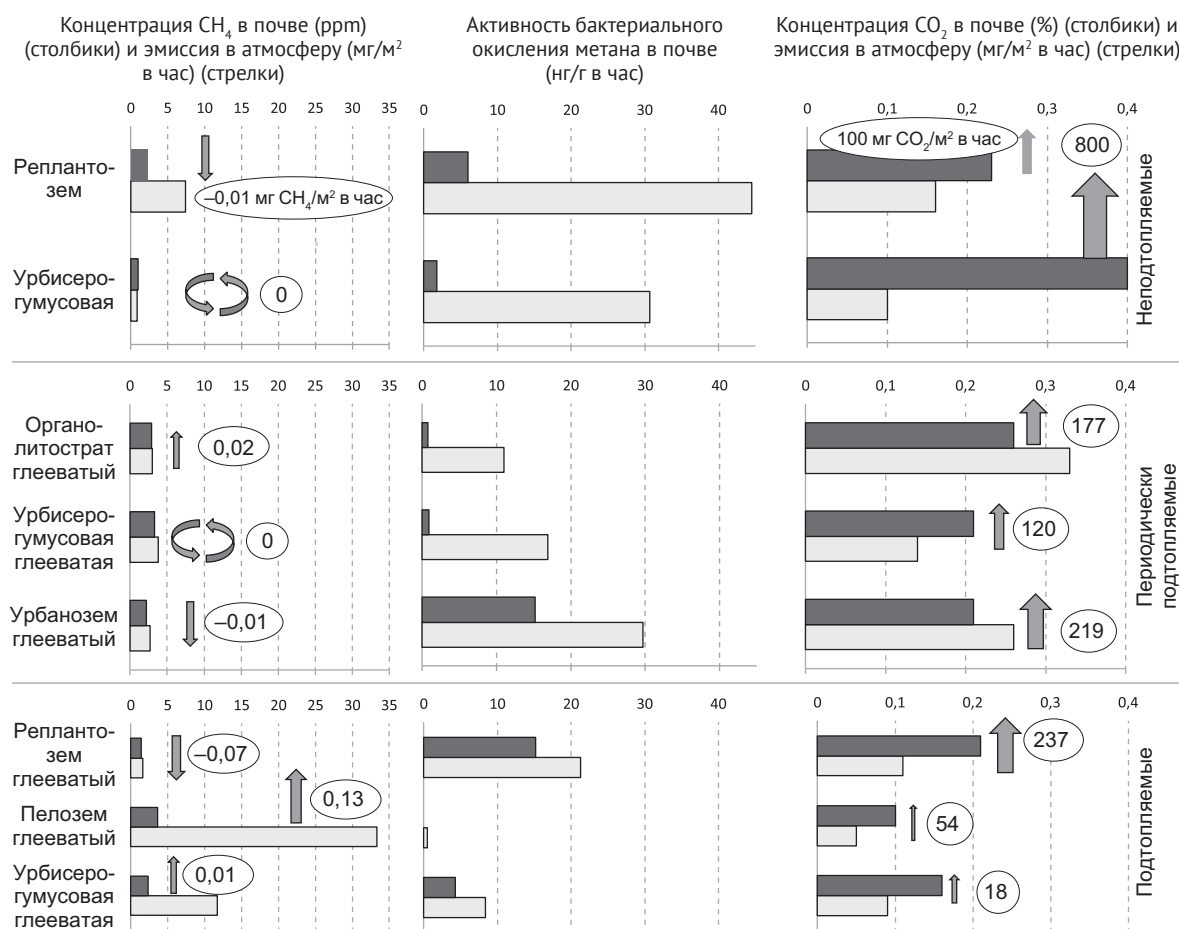
В процессе бактериального окисления метана выделяется углекислый газ, поэтому в аэробных почвах с высокой метанотрофной активностью может повышаться содержание углекислого газа. Однако если окисление идет в пограничных окислительно-восстановительных условиях, оно может быть неполным и  $\text{CO}_2$  образуется существенно меньше [Гальченко, 2001]. Основным источником углекислого газа в почвах и ТПО выступает аэробное разложение органического вещества и дыхание биоты.

## Результаты и обсуждение

*Образование, поглощение и эмиссия парниковых газов  
в городских почвах над погребенными стихийными свалочными телами*

Одной из проблем городов является возникновение стихийных свалочных тел, представляющих опасность для окружающей среды вследствие идущих в них процессов литификации грунтов, сопровождающихся образованием фильтрата и биогаза. По данным Раменского экологического центра, исследовавшего стихийные свалочные тела на территории Москвы, 40% таких образований состояли из бытовых отходов, газогеохимически опасных и пожароопасных, 43% — из строительного мусора и бытовых отходов, потенциально опасных в газогеохимическом отношении, и всего 12% — из строительного мусора, неопасного газогеохимически [Экологический атлас Москвы, 2000 (Карта стихийных свалочных тел)]. В начале 1990-х годов в городе было около 900 га стихийных свалочных тел. В 2005 г. правительство Москвы приняло постановление о проведении работ по рекультивации несанкционированных свалок на территории города. В этом документе был приведен полный перечень всех свалок с указанием местоположения, площади и мощности свалочного тела, состава насыпных грунтов, перспективного использования территории и очередность рекультивации. К 2007 г. количество свалок резко сократилось. Большая часть их к настоящему времени рекультивирована с поверхности. Но опасность от подобных объектов осталась, так как многие из них оказались в погребенном состоянии, в них генерируются метан и углекислый газ, которые могут накапливаться в грунтах и выделяться в приземную атмосферу.

Исследованные нами участки над погребенными стихийными свалочными телами отличались по запечатанности и подтоплению насыпных грунтов. На пяти запечатанных асфальтом участках определение содержания газов, их эмиссии и отбор образцов проводились после бурения скважин геологами. Разная степень подтопления грунтовыми водами (рис. 1) установлена по соответствующей карте из «Экологического атласа Москвы» [2000]. Неподтопляемые районы — это территории самых высоких моренных равнин, изначально наиболее расчлененных овражно-балочной сетью, на насыпных грунтах мощностью до 10 м. Периодически подтопляемые — это районы водно-ледниковых равнин в местах их расчленения днищами долин малых рек, балок и ложбин, с насыпными грунтами мощностью до 7 м. Подтопляемые — районы склонов речных долин, расчлененных овражно-балочной сетью на насыпных грунтах мощностью от 5 до 17 м, при этом грунтовые воды повсеместно встречаются на глубине менее 3 м от поверхности. В районах с подтоплением сформированы те же типы почв и ТПО, что были описаны выше, но с признаками оглеения (сизые и охристо-ржавые пятна, железисто-марганцевые конкреции и примазки) и несколько сниженным Eh. Так как это подсыпанные территории, классических гидроморфных условий не наблюдалось даже в подтопленных районах. В максимальной степени оглеение и восстановительные условия проявляются в запечатанных условиях.



**Рис. 4. Эмиссия метана и углекислого газа в зависимости от профильного распределения содержания этих газов и активности бактериального окисления метана в почвах над погребенными потенциально опасными газогенерирующими грунтами стихийных свалочных тел**

Источник: схема сделана авторами статьи.

Примечание. График построен по средним значениям,  $n$  для каждого столбика от 4 до 8. Темно-серые столбики – данные для верхних горизонтов (для органо-литостратов – верхние 10 см), светло-серые – для нижних техногенных.

**Поглощение и эмиссия метана в различных типах почв.** В результате исследования образования и окисления метана в профиле различных почв выявлено следующее. Аллохтонный метан, мигрирующий от погребенного свалочного тела к поверхности, задерживается на биогеохимическом барьере, формирующемся в нижней части техногенных горизонтов (ТСН) городских почв (максимум на глубине 60 см). Об этом свидетельствует повышенная активность бактериального окисления метана в них по сравнению с верхними гумусированными горизонтами почв и ТПО (рис. 4). При этом активность метаногенеза, как правило, в нижней части профиля снижается, тогда как содержание метана, наоборот, выше. Реплантаземы, урбаноземы и урбисерогумусовые техногенные почвы обладают более высокеемкими метанооксиляющими барьерами по сравнению со слаборазвитыми пелоземами и ТПО без гумусовых горизонтов – органо-литостратами. Если сравнить одинаковые типы почв в районах, отличающихся по подтоплению, то максимальной активностью биологической утилизации метана обладают реплантаземы и урбисерогумусовые техногенные почвы неподтопляемых районов с окислительными условиями. В глееватых подтипах почв в подтопляемых районах интенсивность окисления метана снижается в 2 и более раз из-за ухудшения условий аэрации. На одном из подтопляемых участков было выявлено влияние засоления. Так, актив-



ность бактериального окисления метана в реплантоземах уменьшилась до 4,4 и 4,6 нг/г в час в горизонтах RAT и TCH при слабой и средней степени хлоридного засоления (содержание легкорастворимых солей 0,1–0,3%) соответственно. Это согласуется с данными об ингибировании окисления метана бактериями при солевом стрессе [Гальченко, 2001]

Эмиссия метана в атмосферу проявляется при дисбалансе его бактериального образования и окисления и/или при наличии значительных потоков аллохтонного метана. Среди рассмотренных типов почв и ТПО эмиссия наблюдалась, как правило, из органолитостратов и пелоземов с низкой метанотрофной активностью.

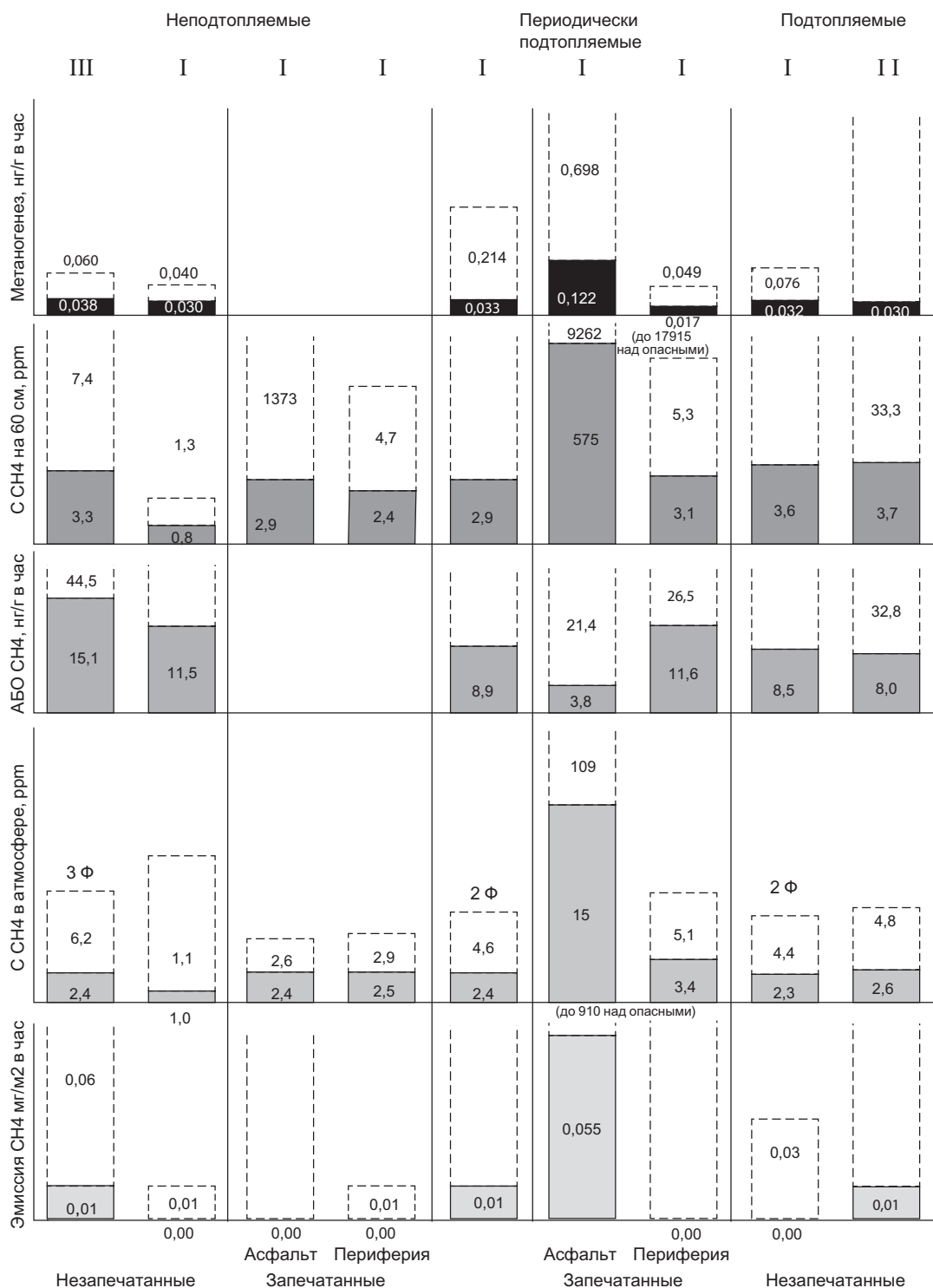
**Пространственные закономерности составляющих цикла метана.** По результатам более масштабного обследования техногенных горизонтов и эмиссионной съемки на участках разной подтопляемости и газогеохимической опасности выявлены следующие закономерности (рис. 5).

Образование автохтонного метана по медианным характеристикам не сильно меняется в техногенных горизонтах почв и ТПО всех рассматриваемых районов. Исключение составляют запечатанные ТПО в периодически подтопляемых подрайонах, что связано с наибольшим развитием восстановительных условий в них. Максимальные проявления метаногенеза увеличиваются при усилении подтопления грунтов.

В условиях приблизительно одинакового автохтонного метаногенеза для всех районов характерно увеличение содержания метана и интенсивности его утилизации над более газогеохимически опасными погребенными свалочными телами. Так, в неподтопляемых районах максимальное содержание метана на глубине 60 см составляет 7,4 и 1,3 ppm соответственно над погребенными пожароопасными и потенциально опасными грунтами, в подтопляемых — 347,8 и 33,3 ppm над опасными и потенциально опасными соответственно. Самое большое накопление метана происходит в случае запечатывания территории. Содержание метана под асфальтом над потенциально опасными грунтами достигает 1373 и 9262 ppm на неподтопляемых и периодически подтопляемых участках соответственно. В случае нахождения над опасными погребенными грунтами максимальные концентрации были выше еще в 2 раза.

Содержание метана в почвенном воздухе зависит не только от опасности погребенных свалочных грунтов, но и от того, насколько активно аллохтонные потоки от них перехватываются бактериальным фильтром в почвах и ТПО. Наибольшая активность бактериального окисления наблюдается в техногенных горизонтах почв и ТПО участков с неподтопляемыми насыпными грунтами. Аллохтонные потоки на незапечатанных территориях почти полностью ассимилируются бактериями, и концентрации метана в профиле почв и ТПО практически везде меньше 10 ppm, что, по нашим данным, соответствует уровню автоморфных природных почв южнотаежной зоны. Уменьшение окислительной способности в глееватых и глеевых техногенных горизонтах приводит к более высокой концентрации метана в них. Минимальная активность бактериального окисления метана отмечается в восстановительных условиях запечатанных грунтов. На запечатанных территориях имеет место боковой перенос газа от запечатанных мест к окружающим территориям (рис. 3), что ведет к резкому повышению бактериального окисления метана в прилегающих к асфальтовому покрытию почвах (до 26,5 нг/г в час) при отсутствии значительного автохтонного бактериального образования метана. То есть осуществляется сток метана, поступающего не только от газогенерирующей толщи снизу, но и за счет латерального переноса от запечатанных участков. Содержание метана в периферийных почвах и ТПО гораздо ниже, чем в запечатанных (рис. 5).

Эмиссия метана в атмосферу в летний период, как правило, отсутствует или низкая (по медианным значениям). Можно сказать, что она не проявляется над потенциально опасными свалками на неподтопляемых участках, так как здесь не происходит накопления метана в атмосфере выше фоновых уровней или оно незначительно. За фоновый уровень мы приняли среднепланетарную концентрацию метана в атмосфере, составляющую в настоящее время 1,85 ppm [Ключевые климатические показатели, 2018]. Над пожароопасными неподтопляемыми свалками возможно повышение содержания в атмосфере в 3 раза выше фона за счет локальных эмиссий. По этой же причине может в 2 раза повышаться концентрация над незапечатанными подтопляемыми и периодически подтопляемыми погребенными свалками. А вот над запечатанными в случае нарушения асфальтового покрытия может наблюдаться очень



**Рис. 5. Образование, окисление, содержание метана в почвах и эмиссия в атмосферу в зависимости от газогеохимической опасности и подогреваемости погребенных стихийных свалочных грунтов**

Источник: графики построены по результатам исследований авторов статьи.

Примечание. I – газогеохимически потенциально опасные грунты, II – опасные грунты, III – пожароопасные грунты. В цветном столбике цифрами показаны медианы (для каждого столбика объем выборки от 5 до 24), в пунктирных столбиках цифрами показаны максимальные значения показателя. 2ф и 3ф – превышение фоновых среднепланетарных показателей в 2 и 3 раза соответственно.

высокая эмиссия метана в атмосферу и накопление его там выше ОБУВ<sup>2</sup>. Нами была обнаружена такая высокая эмиссия метана в атмосферу из-под асфальта в процессе его бурения. Из литературных данных известно [Каллистова и др., 2005], что подобные величины эмиссии могут наблюдаться на полигонах ТБО, где они сильно варьируют в зависимости от возраста: максимальные потоки метана в атмосферу наблюдаются с молодых (5–10 лет) полигонов (0–9057 мг/м<sup>2</sup> в час), более низкие — при возрасте 15 лет и более (около 1 мг/м<sup>2</sup> в час, редко до 150 мг/м<sup>2</sup> в час).

**Пространственные закономерности содержания и эмиссии углекислого газа в различных типах почв.** Значимого вклада бактериального окисления метана в повышение содержания углекислого газа в исследованных почвах над стихийными свалочными телами выявлено не было. Это обусловлено тем, что более весомый вклад в его содержание вносит дыхание корней растений, а также микроорганизмов, разлагающих органическое вещество [Смагин, 2005]. Как правило, эмиссия углекислого газа была выше в почвах с наибольшим его содержанием в верхних горизонтах (рис. 4).

Содержание углекислого газа в техногенных горизонтах почв и ТПО и эмиссия его в атмосферу не выявили зависимости от концентрации этого газа в погребенных свалочных телах. Цифры соответствуют приведенным на рис. 4. По-видимому, интенсивное продуцирование углекислого газа современной почвенной биотой и растениями имеет большее значение, чем миграция газа с глубины. Однако самые высокие концентрации CO<sub>2</sub>, так же как и метана, обнаружены в запечатанных ТПО.

Содержание углекислого газа в атмосфере по медианным значениям над разными участками варьировало в пределах 0,07–0,15% (при среднепланетарном значении 0,04% [Ключевые климатические показатели, 2018]), четких закономерностей выявлено не было. Максимальные концентрации в атмосфере достигали 0,2–0,4%, что связано с наличием наземного источника загрязнения (работающего автотранспорта или строительной техники). Напомним, что такие концентрации, по мнению зарубежных ученых, считаются неблагоприятными для здоровья человека.

*Образование, поглощение и эмиссия парниковых газов в городских почвах, сформированных при засыпании и застройке поймы реки<sup>3</sup>*

Строительство в поймах рек сопровождается инженерной подготовкой территории, направленной на понижение уровня грунтовых вод. До начала строительства грунтовые воды на исследованном участке располагались на уровне не глубже 3 м, на низкой пойме и заболоченном участке они выходили на поверхность. Большая часть поймы была подтоплена, поэтому перед строительством она была засыпана привозными техногенными грунтами, неоднородными по составу и свойствам. С поверхности они имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав, содержали от 5 до 30% строительного и бытового мусора (обломки кирпича и бетона, арматуру, древесину, битое стекло, пластик, полиэтилен и др.). Мощность насыпи варьировала от 1 до 7 м. После засыпки уровень грунтовых вод опустился на глубину 4–7 м, на большей части территории удалось избавиться от подтопления. Локальные признаки переувлажнения отмечались в ТПО, сформированных в непосредственной близости к реке в северо-восточной части участка. Помимо насыпных техногенно-рекрементогенных отложений, на данной территории источниками парниковых газов могут быть погребенные природные органогенные отложения (торф и сапропель), ареалы их распространения, выявленные по данным геологического обследования<sup>4</sup>, показаны на рис. 6, 7.

До начала строительства на исследованной территории доминировали аллювиальные серогумусовые почвы в центральной пойме и аллювиальные перегнойно-глеевые в низкой пойме. В ходе инженерной подготовки территории созданы такие ТПО, как литостраты и органолитостраты, после застройки и благоустройства — реплантоземы. Их свойства соответствуют описанным в начале статьи.

2 ОБУВ — ориентировочно безопасный уровень воздействия, согласно ГН 2.1.6.2309-07 ОБУВ, для метана в атмосферном воздухе населенных мест составляет 50 мг/м<sup>3</sup>.

3 В этом подразделе использованы материалы работы [Лебедь-Шарлевич, 2017].

4 Данные по уровню залегания грунтов, мощности насыпных грунтов и наличию в них погребенных органо-генных отложений были предоставлены специалистами ООО «НПЦ «Экостройгеология». Характеристика поверхностных грунтов составлена авторами статьи.

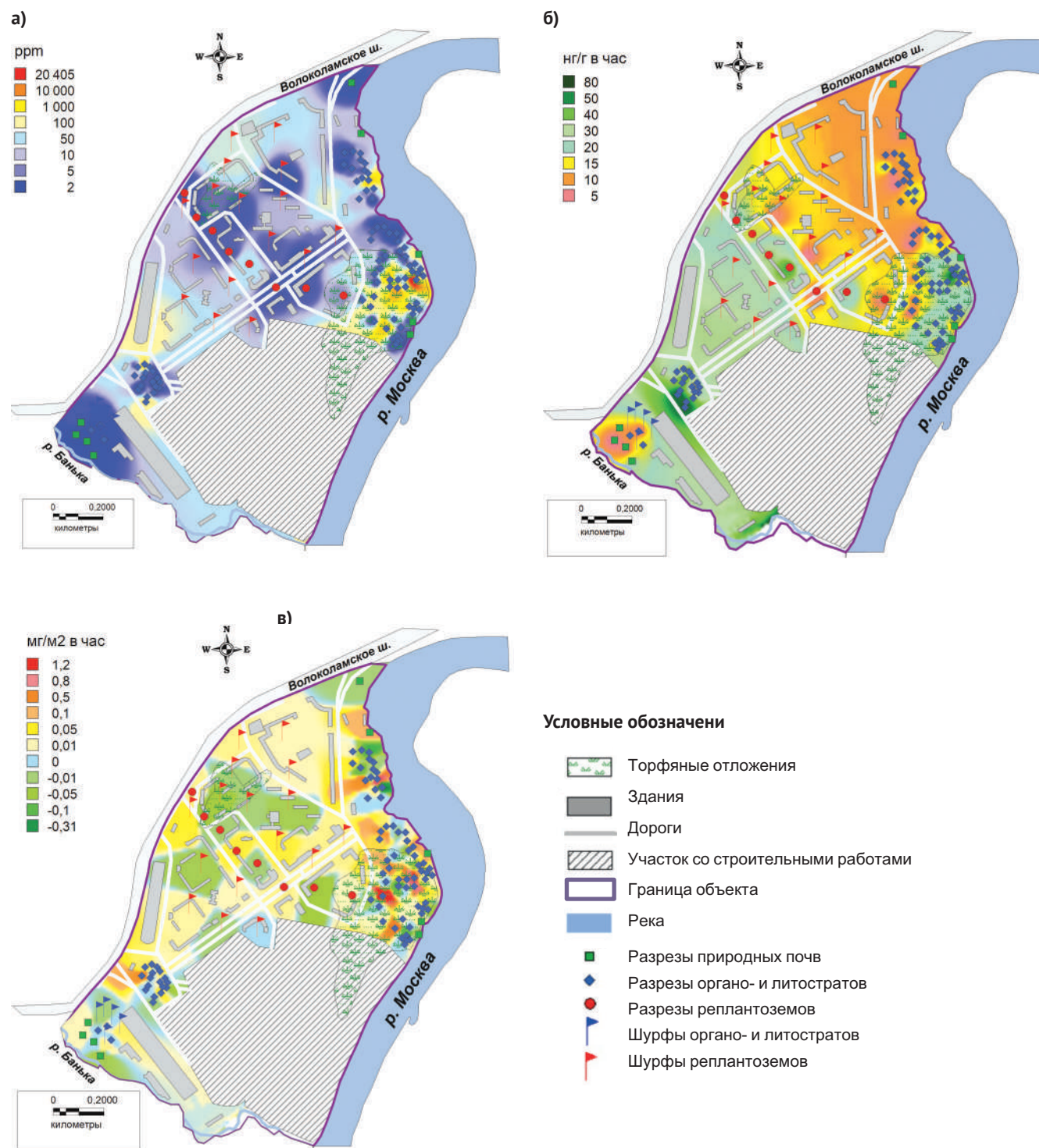


Рис. 6. Картосхемы содержания метана в почвах (а), активности бактериального окисления метана (б) и эмиссии метана в атмосферу (в) на засыпанной пойме Москвы-реки

Источник: картосхемы построены авторами статьи на основе результатов собственных исследований.



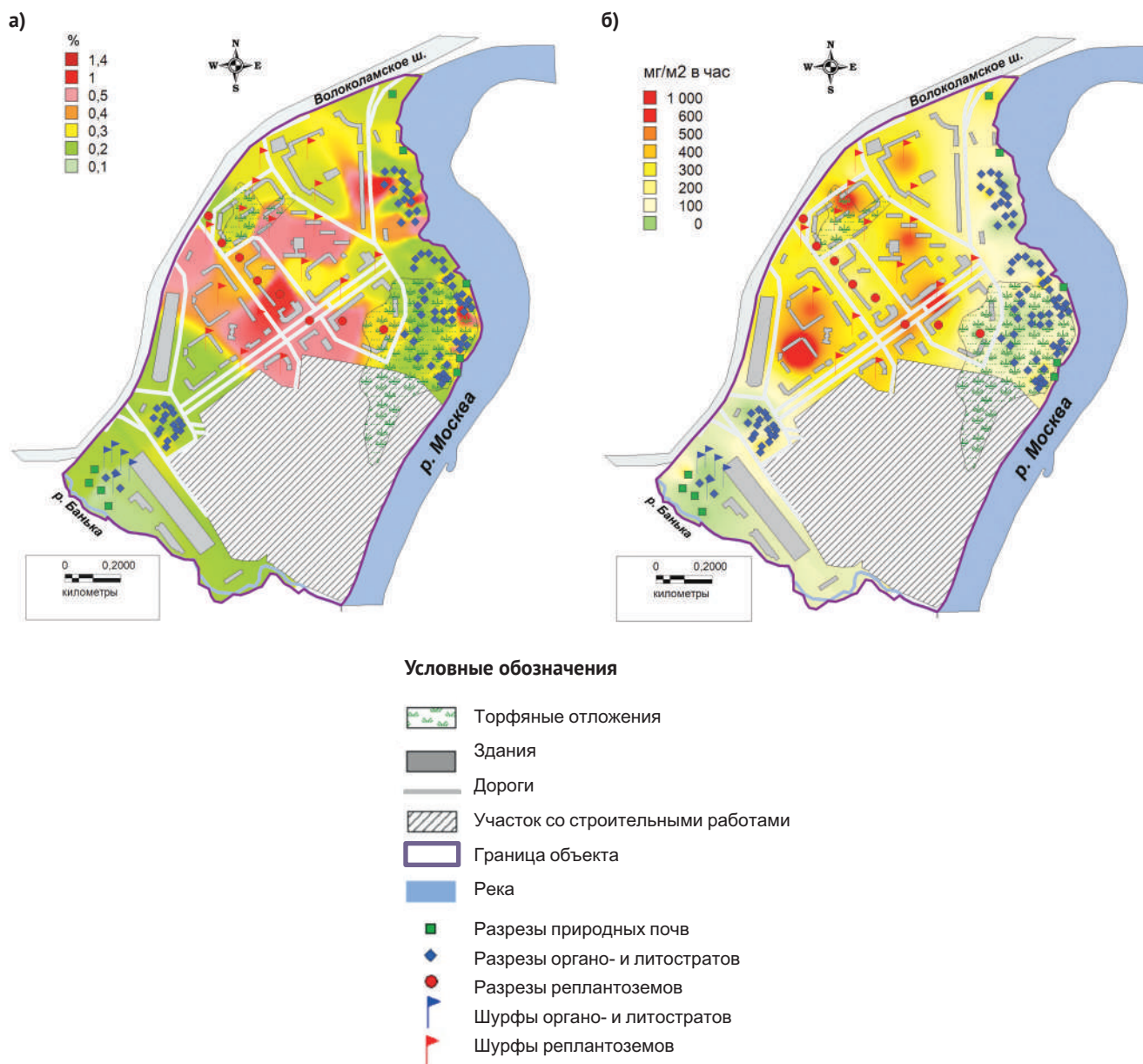


Рис. 7. Картосхемы содержания углекислого газа в почвах (а) и его эмиссии в атмосферу (б) на засыпанной пойме Москвы-реки

Источник: картосхемы построены авторами статьи на основе результатов собственных исследований.

**Пространственные закономерности составляющих цикла метана в различных ТПО засыпанной поймы.** Содержание метана в литостратах и органо-литостратах сильно варьировало по площади из-за неоднородности насыпных грунтов и наличия погребенных торфяных отложений. Оно имело логнормальное распределение с преобладанием низких значений. Выявлено статистически достоверное ( $p < 0,05$ ) повышение содержания метана в профиле ТПО, сформированных на техногенных грунтах, включающих погребенные торфяные слои. Этот ареал выделяется на рис. 6а красновато-желтыми тонами в восточной части участка. На данном участке концентрация метана (медиана) в литостратах составляла 3,0, в органо-литостратах — 3,9 ppm, тогда как в местах без торфяных слоев — 2,7 и 2,9 ppm соответственно. Максимальные значения достигали 20 405 ppm над торфяными отложениями из-за миграции аллохтонного метана и были ниже без них (3045,0 ppm).

Активность бактериального образования метана находилась на среднем уровне, составляла по медиане 0,015 и 0,059 нг/г в час в литостратах и органолитостратах соответственно. Максимальные значения достигали 0,62 нг/г в час. Для этих ТПО характерны значимые положительные корреляционные связи активности бактериального образования метана и содержания органического углерода ( $r = 0,62, p < 0,05$ ).

В ответ на поступление аллохтонного метана и собственное его образование в нижней части техногенных горизонтов литостратов и органолитостратов формировались биогеохимические барьеры за счет окисления метана метанотрофными бактериями. При этом статистически отличаются три группы этих ТПО: первая — ТПО в северо-восточной части участка с наименьшей активностью бактериального окисления метана ( $10,4 \pm 1,5$  нг/г в час), вторая в восточной части над погребенными органогенными отложениями ( $20,6 \pm 3,9$  нг/г в час) и третья в юго-западной части над наиболее сухими и замусоренными насыпными грунтами ( $36,6 \pm 6,2$  нг/г в час). Максимальные значения окисления метана отмечались в первой и третьей группе (62,0 и 77,8 нг/г в час соответственно).

Эмиссия метана в атмосферу не подчинялась статистическому закону нормального распределения и по медианным значениям равнялась 0 для литостратов и 0,01 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2$  в час для органолитостратов. Эмиссия метана до 0,04 мг/м<sup>2</sup> в час может наблюдаться в автоморфных почвах южнотаежной зоны, поэтому считается низкой [Паников и др., 1992]. Локальная повышенная эмиссия метана в атмосферу (больше 0,1 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2$  в час) наблюдалась всего в 18% случаев в первой группе ТПО, в 25% — над погребенными торфяными прослоями и в 6% случаев — в третьей группе ТПО с максимальным бактериальным окислением.

В ходе благоустройства территории на газонах были созданы реплантоземы с рекультивационным горизонтом RAT, в котором при высоком содержании органического углерода ( $4,96 \pm 0,56\%$ ) происходило активное образование метана с максимумом 0,85 нг/г в час. В горизонтах RAT образуется второй биогеохимический барьер, окисляющий собственный — автохтонный — метан, а также завершающий окисление аллохтонного метана, который не утилизируется в техногенных горизонтах. Активность бактериального окисления метана достигала очень высоких значений — 46,9 нг/г в час. Эмиссия метана в атмосферу не превышала природные значения или отсутствовала, происходило поглощение атмосферного метана (рис. 6в).

**Пространственные закономерности содержания и эмиссии углекислого газа в различных ТПО засыпанной поймы.** Содержание углекислого газа в профиле ТПО сильно варьировало по площади (рис. 7а) и зависело преимущественно от разложения органического вещества в грунтах в аэробных условиях. Суммарно для литостратов и органолитостратов значения концентрации  $\text{CO}_2$  в профиле низкие (медиана 0,23%, среднее  $0,29 \pm 0,03$ ), что обусловлено слабой биологической активностью техногенных горизонтов. Локальные повышения обусловлены разложением включений бытового мусора. В реплантоземах содержание углекислого газа повышается за счет интенсификации деятельности микроорганизмов, минерализации торфокомпостного материала и дыхания корней растений. Средняя концентрация  $\text{CO}_2$  в реплантоземах  $0,38 \pm 0,02\%$  (максимум достигает 0,9%).

Эмиссия углекислого газа в атмосферу была минимальна из литостратов и органолитостратов, где она составляла в среднем  $91,7 \pm 12,7$  мг  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в час, медиана 61,9 мг  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в час). Из реплантоземов она гораздо выше, наблюдается сильное варьирование от средних до чрезвычайно высоких значений ( $317,6 \pm 41,9$  мг  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в час, максимально более 1000 мг  $\text{CO}_2/\text{м}^2$  в час) (рис. 7б). Тем самым созданные при благоустройстве реплантоземы вносят существенный вклад в повышение содержания  $\text{CO}_2$  в приземной атмосфере.

*Образование, поглощение и эмиссия парниковых газов в городских почвах, сформированных при рекультивации полей фильтрации сточных вод*

В Москве существует опыт застройки полностью рекультивированных территорий полей фильтрации муниципальных сточных вод (Люблинские и Люберецкие поля). До рекультивации основным фактором экологической опасности таких объектов выступали илы сточных вод. Помимо загрязнения тяжелыми металлами, фосфором и азотом, в них происходило образование биогаза при разложении органического вещества в переувлажненных восстановительных условиях. В процессе рекультивации полей фильтрации опасные иловые осадки

удаляются и утилизируются. Качество проводимых работ обуславливает то, будут ли эти территории представлять экологическую опасность как источник метана и углекислого газа в атмосферу или нет. Это во многом зависит от функционирования почв, формирующихся в ходе рекультивации, в частности, от образования, потребления и эмиссии этих газов из них.

**Пространственные закономерности составляющих цикла метана в различных ТПО рекультивированных полей фильтрации.** В процессе рекультивации значительно снижается концентрация метана, обусловленная его активным образованием в анаэробной толще илов сточных вод (с целых процентов в илах до единиц ppm в созданных литостратах, органо-литостратах и реплантоземах), эмиссия метана в атмосферу (в среднем с 0,2–0,9 до 0–0,01 мг CH<sub>4</sub> м<sup>2</sup> в час), содержание в атмосфере (с 37 до 2–3 ppm). Эти цифры характерны для летнего периода [Kulachkova, Mozharova, 2015].

В литостратах в зимний период иногда наблюдались аномальные значения метана в профиле, проявлялась довольно высокая эмиссия в атмосферу, содержание в приземном слое воздуха могло превышать среднепланетарное фоновое на порядок (табл. 1).

**Таблица 1. Сезонная динамика концентрации и эмиссии метана и углекислого газа в ТПО рекультивированных полей фильтрации**

ТПО		Концентрация в профиле ТПО		Эмиссия в атмосферу, мг/м <sup>2</sup> × ч <sup>-1</sup>		Концентрация в атмосфере	
		CH <sub>4</sub> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , ppm	CO <sub>2</sub> , %
Литостраты	Весна	2,4–57,2	0,07–0,33	0,02–0,24 (31%)	3,7–198	1,7–3,4	0,06–0,22 (62%)
	Лето	1,9–3,8	0,08–0,50	< 0–0,02	< 0–145	2,5–4,3	0,06–0,25 (57%)
	Осень	2,4–47,0	0,12–0,60 (4%)	0–0,15 (9%)	0–270	1,4–5,7	0,03–0,16 (47%)
	Зима	1,8–120,0 (7%)	0,08–0,64 (7%)	0–0,98 (44%)	0–170	2,1–16,3 (7%)	0,03–0,12 (13%)
Органолитостраты	Весна	3,0–944,0 (12%)	0,53–2,26 (100%)	0,02–8,74 (62%)	125–1900 (25%)	1,5–2,0	0,07–0,08
	Лето	2,9–6,9	0,16–0,50	< 0–0,01	< 0–318	2,6–4,8	0,06–0,24 (95%)
	Осень	3,4–16670 (45%)	0,10–2,20 (55%)	0–3,7 (18%)	50–790 (27%)	2,4–7,3 (27%)	0,04–0,16 (36%)
	Зима	4,5–2580 (25%)	0,30–0,82 (75%)	0,09–51,51 (50%)	82–260	3,6–6,6 (25%)	0,07

*Примечание.* В скобках дана частота встречаемости значений (в %), превышающих для метана: концентрации в почвах – 100 ppm; эмиссии в атмосферу – 0,10 мг CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup> в час; концентрации в атмосфере – 6 ppm; для диоксида углерода: концентрации в почвах – 0,5%; эмиссии в атмосферу – 500 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в час; концентрации в атмосфере – 0,1%.

*Источник:* данные авторов.

В органо-литостратах в холодный период года до 20% опробованных ТПО характеризовались потенциально опасным и даже опасным содержанием метана, очень интенсивной эмиссией и некоторым накоплением в приземном слое. Таким образом, участки с органо-литостратами выступали индикаторами не вполне успешно проведенной рекультивации, при которой

имело место либо неполное изъятие осадка, либо планирование территории велось с помощью грунтов, в толще которых возможно образование компонентов биогаза и его миграция к поверхности. Интенсивная эмиссия в весенний период, вероятно, была связана с конвективными потоками при прогревании и иссушении почв после зимнего периода. Зимой метан мог выделяться по трещинам, образующимся при замерзании грунта.

Минимальные показатели содержания и эмиссии метана в летний период обусловлены наибольшей активностью бактериального окисления метана в ТПО (рис. 8).

В молодых реплантоземах активность метаногенеза среднего уровня отмечается в поверхностных горизонтах RAT (0,01–0,09 нг/г в час), снижается на порядок в подстилающих песчаных техногенных горизонтах. С течением времени при минерализации торфокомпостных горизонтов метаногенез в них уменьшается в 10 раз. Бактериальное окисление метана в горизонтах RAT молодых реплантоземов высокое (18–20 нг/г в час), препятствует его эмиссии в атмосферу, снижается с течением времени в разы. В нижележащих минеральных горизонтах активность окисления может сильно варьировать в зависимости от наличия включений остатков иловых отложений в нижележащих грунтах в среднем от 3 до 15 нг/г в час. Этого оказывается достаточно, чтобы реплантоземы и сформированные из них впоследствии урбисерогумусовые техногенные почвы не являлись источником метана в атмосферу в летнее время.

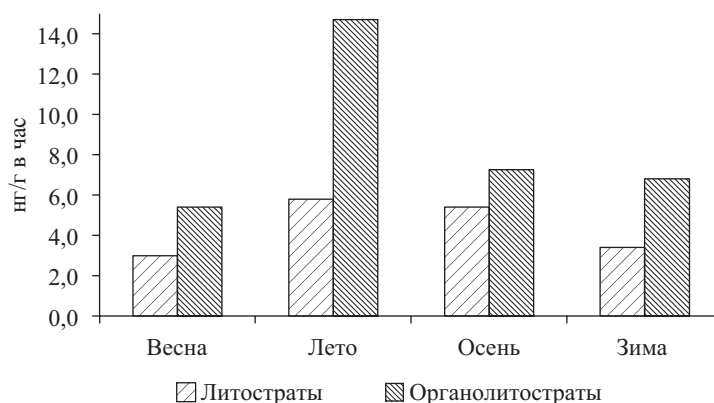


Рис. 8. Сезонная динамика активности бактериального окисления метана (медианы) в ТПО рекультивированных полей фильтрации сточных вод

Источник: данные авторов.

**Пространственные закономерности содержания и эмиссии углекислого газа в различных ТПО рекультивированных полей фильтрации.** В летний период не наблюдается опасных концентраций углекислого газа в профиле ТПО и экстремально высоких значений эмиссии в атмосферу. В весенний и осенний периоды, при увеличении влажности и замедлении миграции, происходит накопление  $\text{CO}_2$  в толще ТПО, особенно органолитостратов, и возможны редкие (в 25–27% ТПО) интенсивные выделения в атмосферу, которые быстро рассеиваются (табл. 1).

Эмиссия углекислого газа наибольшая в первые годы после рекультивации, по мере минерализации торфокомпостных горизонтов реплантоземов и трансформации их в серогумусовые она снижается до природных значений. По нашим данным, до 70% рекультивированной территории Люблинских полей фильтрации 15-летнего возраста еще испытывают влияние аллохтонных потоков метана и углекислого газа от погребенных остаточных фрагментов илов сточных вод. На территориях 30-летнего возраста этот процент снижается до 25.

## Заключение

На основе представленных материалов можно сделать следующие выводы. Городские почвы, выполняя экологические функции, препятствуют поступлению парниковых газов от газогенерирующих слоев, погребенных в толще насыпных грунтов, образованных при строительстве.



Так, над стихийно образованными свалочными телами в городе наиболее эффективно утилизация метана происходит в летний период в автоморфных урбисерогумусовых техногенных почвах, урбаноземах техногенных и реплантоземах. Эмиссии в атмосферу, как правило, не происходит даже при формировании почв на мощных загрязненных грунтах. Ухудшение почвенных свойств в органо- и литостратах, в слабразвитых почвах, при подтоплении, загрязнении легкорастворимыми солями и запечатывании снижает их окислительную активность и повышает вероятность эмиссии метана в атмосферу. Исследования подтвердили, что эмиссия углекислого газа зависит от его образования в почвах и грунтах, условий увлажнения, дыхания почвенных микроорганизмов и растений. Как правило, она наибольшая в летний период и в наиболее аэрированных, гумусированных почвах с хорошо развитой растительностью.

На засыпанных поймах выявлены похожие закономерности. Почвенное бактериальное окисление отвечало на потоки метана из более глубоких слоев повышением как минимум в 2 раза по сравнению с их отсутствием. Литостраты и органолитостраты перехватывали аллохтонные потоки не всегда достаточно эффективно, наблюдались локальные всплески повышенной эмиссии метана в атмосферу, тогда как система биогеохимических барьеров, сформированная в реплантоземах, полностью ассимилировала поступающий и собственный метан. Однако реплантоземы, осуществляя сток метана, выступали значительным источником углекислого газа в атмосферу.

Почвы рекультивированных полей фильтрации в летний период, как и на предыдущих объектах, осуществляют сток метана, а в холодное время года могут представлять некоторую опасность для загрязнения атмосферы парниковыми газами.

Выявленные общие закономерности в функционировании городских почв исследованных объектов позволяют предложить некоторые рекомендации по уменьшению потоков парниковых газов в атмосферу. Необходимо организовывать строгий контроль над используемыми грунтами при строительстве, они не должны содержать органического мусора, разложение которого приводит к выделению парниковых газов. При благоустройстве территорий необходимо осушать переувлажненные участки, сокращать площадь запечатанности, использовать альтернативные асфальтовым покрытиям материалы при создании дорожек, наземных парковок для автотранспорта, обеспечивающие аэрацию находящихся под ними грунтов. Для снижения эмиссии углекислого газа при разложении торфокомпостных субстратов, используемых для газонов, требуется разработка альтернативных почвогрунтов.

#### Источники

- Гальченко В.Ф. (2001) Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. (1986) Экологические функции почвы. М.: Изд-во МГУ.
- Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2014 году» (2015) / под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС; НИА-Природа.
- Заварзин Г.А. (1997) Эмиссия метана с территории России // Микробиология. Т. 66. № 5. С. 669–673.
- Каллистова А.Ю. и др. (2006) Эмиссия метана с поверхности полигона захоронения твердых бытовых отходов в зависимости от возраста полигона и от времени года // Экологическая химия. Т. 15. Вып. 1. С. 13–21.
- Классификация и диагностика почв России. (2004) / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена.
- Ключевые климатические показатели. (2018) // Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 г. // ВМО. № 1212. С. 5–9. Режим доступа: [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=4457](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4457) (дата обращения: 15.11.2019).
- Методы почвенной микробиологии и биохимии. (1991) / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ.
- Можарова Н.В., Кулачкова С.А., Лебедь-Шарлевич Я.И. (2018) Эмиссия и поглощение парниковых газов в почвах Москвы // Почвоведение. № 3. С. 1–13.
- Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг. (2006) М.: Росгидромет.
- Паников Н.С. и др. (1992) Образование и потребление метана в почвах Европейской части СССР // Журнал экологической химии. № 1. С. 9–26.
- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. (2001) / под ред. Е.В. Шеина. М.: Изд-во МГУ.
- Прокофьева Т.В. и др. (2014) Введение почв и почвоподобных образований городских территорий

- в классификацию почв России // Почвоведение. № 10. С. 1155–1164.
- Розанов Б.Г. (2004) Морфология почв: учеб. для высшей школы. М.: Академический Проект. С. 359
- Смагин А.В. (2005) Газовая фаза почв. М.: Изд-во МГУ.
- Степанов А.Л., Манучарова Н.А. (2006) Образование и поглощение парниковых газов в почвенных агрегатах. М.: Изд-во МГУ.
- Теория и практика химического анализа почв. (2006) / под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС.
- Экологический атлас Москвы. (2000) М.: АБФ/ABF.
- Carbon and Other Biogeochemical Cycles, 2013 (2013) // IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker et al. (eds). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Press C.U. P. 465–570.
- Decina S.M. et al. (2016) Soil Respiration Contributes Substantially to Urban Carbon Fluxes in the Greater Boston Area // Environmental Pollution. Vol. 212. P. 433–439.
- Kulachkova S., Mozharova N. (2015) Generation, Sink, and Emission of Greenhouse Gases by Urban Soils of Reclaimed Filtration Fields // Journal of Soils and Sediments. Vol. 15. No. 8. P. 1753–1763.
- Livesley S.J. et al. (2010) Soil-atmosphere Exchange of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide in Urban Garden Systems: Impact of Irrigation, Fertiliser and Mulch // Urban Ecosyst. Vol. 13. P. 273–293.
- Robertson D.S. (2006) Health Effects of Increase in Concentration of Carbon Dioxide in the Atmosphere // Current Science. Vol. 90. No. 12. P. 1607–1609.
- Satterthwaite D. (2008) Cities' Contribution to Global Warming: Notes on the Allocation of Greenhouse Gas Emissions // Environment & Urbanization. Vol. 20. No. 2. P. 539–549.
- Serrano-Silva N. et al. (2014) M. Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review // Pedosphere. Vol. 24. No. 3. P. 291–307.

## Приложение 1

### Термины и определения

**Автохтонные метан и углекислый газ** — газы, образующиеся непосредственно в самой почве в процессе трансформации находящегося в ней органического вещества.

**Аллохтонные метан и углекислый газ** — газы, привнесенные в почву из нижележащих почвообразующих пород и подстилающих грунтов.

**Литостраты** — насыпные минеральные грунты: отвалы вскрышных и вмещающих пород горнодобывающих и строительных предприятий, грунтовые насыпи и выравненные грунтовые площадки, создающиеся при разработке и обустройстве месторождений полезных ископаемых, строительстве поселков и проч. Относятся к техногенным поверхностным образованиям [*Классификация и диагностика почв России, 2004*].

**Оглеение** — процесс метаморфического преобразования минеральной почвенной массы в результате постоянного или периодического переувлажнения, приводящего к сильному развитию восстановительных процессов, иногда (или локально) сменяемых окислительными; признаки оглеения — сизоватые и зеленоватые тона окраски, охристо-ржавые пятна, конкреции и примазки [*Розанов, 2004, с. 359*].

**Органолитостраты** — смешанный несортированный органоминеральный материал. Это могут быть искусственные смеси органического и минерального материала, а также гумусированный мелкоземистый почвенный материал, предварительно срезанный и складированный для последующей рекультивации. Относятся к техногенным поверхностным образованиям [*Классификация и диагностика почв России, 2004*].

**Пелоземы гумусовые** — слаборазвитые почвы, профиль которых состоит из гумусово-слаборазвитого горизонта (W, мощность менее 5 см), залегающего непосредственно на рыхлых отложениях тяжелого (глинистого и суглинистого) гранулометрического состава [*Классификация и диагностика почв России, 2004*].

**Псаммоземы гумусовые** — слаборазвитые почвы, профиль которых состоит из гумусово-слаборазвитого горизонта (W, мощность менее 5 см), залегающего непосредственно на песчаной почвообразующей породе гранулометрического состава [*Классификация и диагностика почв России, 2004*].

**Потенциометрический метод** — электрохимический метод анализа, основанный на зависимости потенциала электрода от активности (концентрации) определяемого иона [Теория и практика химического анализа почв, 2006, с. 66].

**Реплантоземы** — целенаправленно созданные образования (земли, рекультивированные главным образом под сельскохозяйственное использование), которые характеризуются залеганием гумусированного или минерально-органического плодородного слоя на предварительно подготовленной (обычно спланированной) поверхности нарушенных грунтов, в том числе насыпных. Относятся к техногенным поверхностным образованиям [Классификация и диагностика почв России, 2004]. Имеют диагностический горизонт RAT — насыпной компостный, торфокомпостный или гумусированный материал, используемый для рекультивации и слабо измененный почвообразованием [Прокофьева и др., 2014].

**Рекрементогенный материал** — (от лат. Recrementum — отбросы, нечистоты, мусор) бытовой мусор (стекло, бумага, синтетические продукты, пищевые отходы, текстильные материалы и проч.), строительный мусор (кирпич, цементная крошка, древесина и т.д.), материал осадков сточных вод.

**Урбаноземы (син. урбостратоземы)** — синлитогенные городские почвы, образующиеся при постепенном поступлении небольших порций «породного» субстрата и в наибольшей степени соответствующие городской среде. Термин «урбанозем» предложен М.Н. Строгановой с соавторами. Имеют диагностический поверхностный серовато-бурый горизонт урбик, характеристики которого подробно описаны Т.В. Прокофьевой с соавторами. Главные из них: мощность (больше 5 см на техногенных субстратах, не менее 40 см — на естественных почвенных горизонтах), содержание артефактов более 10%, признаки слоистости, реакция среды от нейтральной до щелочной, частое вскипание от HCl, содержание загрязняющих веществ не более 2ПДК/ОДК, повышенное содержание фосфора. Выделяют три типа: собственно урбаноземы, урбаноземы на погребенных почвах и урбаноземы техногенные [Прокофьева и др., 2014].

**Урбисерогумусовые техногенные почвы** — молодые городские почвы, развивающиеся на техногенном субстрате, имеющие поверхностный серогумусовый горизонт, мощностью более 5 см, с урбиковыми признаками, но недостаточными для выделения диагностического горизонта урбик.

SVETLANA KULACHKOVA, YANA LEBED-SHARLEVICH,  
NADEZHDA MOZHAROVA, ANNA NIKOLAEVA

## THE ROLE OF URBAN SOILS

### IN THE REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

**Svetlana A. Kulachkova**, PhD, Senior Researcher, The Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; 1 bldg. 12 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, tel.: +7 (916) 488-90-77  
E-mail: kulachkova\_sa@inbox.ru

**Yana I. Lebed-Sharlevich**, PhD, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution "The Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks" of the Ministry of Health of the Russian Federation (Centre for Strategic Planning, Russian Ministry of Health); 10 bldg. 1 Pogodinskaya Ulitsa, Moscow, 119121, Russian Federation, tel.: +7 (916) 580-26-43  
E-mail: yana.l-sh@mail.ru

**Nadezhda V. Mozharova**, DSc (*in the past*: Assistant Professor, The Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University); 1 bldg. 12 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation.  
E-mail: nvm47@list.ru

**Anna M. Nikolaeva**, Junior Researcher, Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology (IGCE); 20b Glebovskaya Ulitsa, Moscow, 107258, Russian Federation, tel.: +7 (926) 469-74-80  
E-mail: amnik21@yandex.ru

#### Abstract

The article is devoted to modern issues of greenhouse gas emissions into the atmosphere in the urban environment and the identification of the role of soils in regulating this process. Three types of potentially gas-generating objects were investigated: territories over buried natural landfill layers, construction sites on a river floodplain and reclaimed wastewater filtration fields. For each object type, the types of dominant soils, their physical, chemical properties, and the ability to generate and oxidize methane, produce carbon dioxide were determined. We demonstrate that more developed Urbic Technosols (Humic), as well as Urbic Technosols (Folic) created during the landscaping, more efficiently utilize allochthonous methane fluxes than Urbic Technosols (Transportic) and underdeveloped soils. Emissions of methane to the atmosphere from the first group of soils are not observed, but they serve as a more powerful source of carbon dioxide in the atmosphere compared to the second group of soils. Sealing, over compaction, salinization, flooding of urban soils reduce their oxidative ability and increase the probability of methane emissions into the atmosphere.

In connection with the growth of industrialization, cities are becoming increasingly important in the circulation of substances in nature. Cities act as sources of greenhouse gases, which are emitted by industry, road transport, landfills, and urban soils. Due to the increase in population density, there are more and more areas with unfavorable environmental conditions, such as overmoist floodplains, filled ravines, unauthorized waste dumps, and reclaimed filtration fields are being built up. Urban soils in such areas are sources of and sinks for methane and carbon dioxide.

**Takeaway for practice:** This study is important for understanding the contribution of urban soils to greenhouse gas emissions, which is still unknown. The results can be used in the development of recommendations for the reclamation of potentially dangerous geochemical gas areas used for construction.

**Key words:** methane; carbon dioxide; technogenic soil; biogas; greenhouse gas emission; functioning of urban soils

**Citation:** Kulachkova S., Lebed-Sharlevich Y., Mozharova N., Nikolaeva A. (2018) The Role of Urban Soils in the Regulation of Greenhouse Gas Emissions. *Urban Studies and Practices*, vol. 3, no 3, pp. 48–68 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.17323/usp33201848-68>

#### References

- Carbon and Other Biogeochemical Cycles, 2013 (2013). IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocke et al. (eds). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Press C.U., pp. 465–570.



- Decina S.M. et al. (2016) Soil Respiration Contributes Substantially to Urban Carbon Fluxes in the Greater Boston Area. *Environmental Pollution*, vol. 212, pp. 433–439.
- Dobrovol'skiy G.V., Nikitin Ye.D. (1986) *Ekologicheskiye funktsii pochvy* [Ecological functions of soil]. Moscow: Izd-vo MGU [Publishing House of Moscow State University]. (in Russian)
- Doklad "O sostoyanii okruzhayushchey sredy v gorode Moskve v 2014 godu". (2015) [Report "On the state of the environment in the city of Moscow in 2014"] / A.O. Kul'bachevskii (ed.). Moscow: DPIOOS; NIA-Priroda. (in Russian)
- Ekologicheskiy atlas Moskvy. (2000) [Ecological atlas of Moscow]. Moscow: ABF/ABF. (in Russian)
- Gal'chenko V.F. (2001) *Metanotrofnyye bakterii* [Methanotrophic bacteria]. Moscow: GEOS. (in Russian)
- Kallistova A.YU. et al. (2006) Emissiya metana s poverkhnosti poligona zakhroneniya tverdykh bytovykh otkhodov v zavisimosti ot vozrasta poligona i ot vremeni goda [Emission of methane from the surface of a landfill for the disposal of solid domestic waste, depending on the age of the landfill and on the season of the year]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological chemistry], vol. 15, no 1, pp. 13–21. (in Russian)
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii. (2004) [Classification and diagnostics of soils in Russia] / L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena. (in Russian)
- Klyuchevye klimaticheskie pokazateli (2018) [Key climate indicators, 2018]. Zayavlenie WMO o sostoyanii globalnogo klimata v 2017 godu [WMO statement on the state of the global climate in 2017]. WMO, no 1212, pp. 5–9. Available at: [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=4457](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4457) (accessed 15 November 2019).
- Kulachkova S., Mozharova N. (2015) Generation, sink, and emission of greenhouse gases by urban soils of reclaimed filtration fields. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 15, no 8, pp. 1753–1763.
- Livesley S.J. et al. (2010) Soil-atmosphere Exchange of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide in Urban Garden Systems: Impact of Irrigation, Fertiliser and Mulch. *Urban Ecosyst*, vol. 13, pp. 273–293.
- Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii. (1991) [Methods of soil microbiology and biochemistry] / D.G. Zvyagintsev (ed.). Moscow: Izd-vo MGU [Publishing House of Moscow State University]. (in Russian)
- Mozharova N.V., Kulachkova S.A., Lebed'-Sharlevich Y.I. (2018) Emissiya i pogloshcheniye parnikovykh gazov v pochvakh Moskvy [Emission and consumption of greenhouse gases in Moscow soils]. *Pochvovedeniye* [Soil Science], no 3, pp. 1–13. (in Russian)
- Natsional'nyy doklad Rossiyskoy Federatsii o kadastro antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtitsii poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruyemykh Monreal'skim protokolom za 1990–2004 gg. (2006) [National report of the Russian Federation on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2004]. Moscow: Roshydromet. (in Russian)
- Panikov N.S. et al. (1992) Obrazovaniye i potrebleniye metana v pochvakh Yevropeyskoy chasti SSSR [Generation and consumption of methane in the soils of the European part of the USSR]. *Zhurnal ekologicheskoy khimii* [Journal of Ecological Chemistry], no 1, pp. 9–26. (in Russian)
- Polevyie i laboratornyye metody issledovaniya fizicheskikh svoystv i rezhimov pochv. (2001) [Field and laboratory methods for studying physical properties and regimes of soils] / Ye.V. Shein (ed.). Moscow: Izd-vo MGU [Publishing House of Moscow State University]. (in Russian)
- Prokof'yeva T.V. et al. (2014) Vvedeniye pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskikh territoriy v klassifikatsiyu pochv Rossii [Introduction of soils and soil-like formations of urban areas into the soil classification of Russia]. *Pochvovedeniye* [Soil Science], no 10, pp. 1155–1164. (in Russian)
- Robertson D.S. (2006) Health Effects of Increase in Concentration of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Current Science*, vol. 90, no 12, pp. 1607–1609.
- Satterthwaite D. (2008) Cities' Contribution to Global Warming: Notes on the Allocation of Greenhouse Gas Emissions. *Environment & Urbanization*, vol. 20, no 2, pp. 539–549.
- Serrano-Silva N. et al. (2014) Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review. *Pedosphere*, vol. 24, no 3, pp. 291–307.
- Smagin A.V. (2005) *Gazovaya Faza Pochv* [Gas phase of soils]. Moscow: Izd-vo MGU [Publishing House of Moscow State University]. (in Russian)
- Stepanov A.L., Manucharova N.A. (2006) Obrazovaniye i pogloshcheniye parnikovykh gazov v pochvennykh agregatakh [Generation and consumption of greenhouse gases in soil aggregates]. Moscow: Izd-vo MGU [Publishing House of Moscow State University]. (in Russian)
- Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv. (2006) [Theory and practice of chemical soil analysis] / L. Vorob'eva (ed.). Moscow: GEOS. (in Russian)
- Zavarzin G.A. (1997) Emissiya metana s territorii Rossii [Emission of methane from the territory of Russia]. *Mikrobiologiya* [Microbiology], vol. 66, no 5, pp. 669–673. (in Russian)