

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.44

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ: ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

© 2019 г. С. В. Горячкин¹, *, Н. С. Мергелов¹, В. О. Таргульян¹

¹Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

*e-mail: goryachkin@igras.ru

Поступила в редакцию 14.06.2018 г.

После доработки 21.06.2018 г.

Принята к публикации 29.08.2018 г.

Экстремальные условия среды, например, в Арктике, Антарктиде, высокогорьях, экстрааридных пустынях, а также связанные с токсичными или бедными по содержанию питательных элементов субстратами, мелководьями, интенсивными антропогенными воздействиями, специфической атмосферой или ее отсутствием во внесезонных системах, приводят к формированию почв и солоидов (почвоподобных тел), которые не могут быть адекватно описаны, а их генезис удовлетворительно объяснен в рамках традиционного докучаевского почвоведения и географии почв. Предлагается новое научное направление – генезис и география почв экстремальных условий (extreme pedology), требующее своей теории, понятийного аппарата и методологической основы. Оно основано на положении, что почвы и солоиды могут развиваться в экстремальных условиях, как при недостатке, так и при избытке ресурсов. В первом случае мощность солоидов составляет первые миллиметры, а во втором формируются многометровые почвоподобные тела. Выделяются различные классы экстремальности почв и солоидов: факторная, режимно-функциональная и хронологическая (внеареальная) экстремальность. Поведение экстремальных объектов во времени и характер педогенной записи в них могут иметь как специфические, так и общие с нормальными почвами черты. Морфоаналитическое изучение почв и солоидов экстремальных условий требует применения современных методических подходов и научного оборудования.

Ключевые слова: пустыни, полярные области, высокогорья, пещерные почвоподобные тела, эндолиты, внесезонные почвоподобные тела, антропогенные почвы, коры выветривания

DOI: 10.1134/S0032180X19010040

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальный, экстремальность – слова, пронизывающие жизнь в XXI веке (экстремал, экстремальный туризм и т. д.), которые обозначают чрезвычайность, необычность, предельность, сложность, крайность. Встречаются эти термины и в фундаментальных науках, от математики до биологии. В последней, особенно в ее микробиологической части, с изучением существования и функционирования организмов в экстремальных условиях связываются такие базовые научные понятия, как ниши и эволюция [58]. В биологии почв стало развиваться направление “микробиология экстремальных почв” [49].

Между тем, генезис и география почв (pedology), формирующихся в неблагоприятных для почвообразования условиях, в настоящее время совершенно не интегрированы в единое научное направление. Почвы полярных областей, экстрааридных пустынь, ультраконтинентальных условий изучаются разными коллективами и

классифицируются наряду с обычными почвами, причем, как правило, как слаборазвитые. Ведь минимальная мощность для диагностических горизонтов составляет не менее 2.5 см в современных классификационных системах [59]. Такие биокосные образования как “пустынные загары”, “почвопенки”, несмотря на фундаментальные труды Б.Б.Полынова [29] и М.А. Глазвской [6], теперь изучаются не почвоведомы, а биогеохимиками и геобиологами [43, 50, 77]. С другой стороны, многометровые толщи кор выветривания и рыхлых отложений, про которые Б.Б. Полынов писал, что “почвоведение... ближе, чем другие науки подходит к процессам, протекающим в этой оболочке” [28, с.5], теперь исследуются специалистами по экологии суши (terrestrial ecology), которые занимают “критическими зонами” [53]. Несмотря на активное изучение, совершенно в стороне от “мэйнстрима” географии почв оказались и почвы, формирующиеся в экстремальных условиях, созданных человеком – в условиях катастрофической эрозии, в селитьбах

на многометровых культурных слоях, а также при интенсивных техногенных воздействиях. Между тем, познание таких почвенных образований имеет большое фундаментальное значение, выходящее за рамки географии и почвоведения и имеющее значение для наук о Земле в целом.

На протяжении большей части геологической истории в несколько миллиардов лет на Земле могли существовать почвы только в экстремальных по отношению к сегодняшнему дню условиях. Лишь около 400 млн лет существует растительность с корневыми системами. Поэтому современные почвы Антарктиды, высокогорий, некоторых пустынь с бактериальным и криптогамным (мохово-лишайниково-водорослевым) покровом могут рассматриваться как аналоги почв далекого прошлого [65]. Познавая их, мы подходим к возможности реконструкции органо-минеральных взаимодействий древних эпох. Подобные тела в почвенном покрове Земли возникали и много позже во время экстремальных для биосферы событий, в том числе плейстоценовых оледенений [2, 25, 26].

Изучение генезиса и географии экстремальных почв позволяет также адекватно описывать внеземные почвоподобные тела, формирующиеся на Марсе, других планетах и их спутниках [38, 67].

Помимо фундаментально-научного значения, осознание существования экстремальных почв и их географического разнообразия, а также их исследование имеет и большое социально-экономическое значение. Помимо современного этапа освоения Арктики и Антарктиды, в отдаленной перспективе, как прогнозировали такие выдающиеся умы, как К.Э. Циолковский, С. Хокинг, К. Саган и другие, человечество вынуждено будет покинуть Землю. Ученые должны будут обеспечивать землян нужной информацией об окружающей среде колонизируемых планет, в том числе о почвах и почвоподобных телах. Для решения этих отдаленных задач фундамент нужно начинать готовить сегодня.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ПОЧВОВЕДЕНИИ ПРОШЛОГО И НАСТОЯЩЕГО

Прежде чем давать определение экстремальных (чрезвычайных, необычных) объектов почвоведения, рассмотрим некоторые ранее предложенные подходы, имеющиеся в нашей науке.

В последней четверти прошлого века появилась серия работ по определению понятия “почва”, объектам почвоведения и классификации почв. В.М. Фридланд [39] предложил включить в классификацию почв “парапочвы (почвоподобные тела)” — то есть тела на поверхности Земли, “способные обеспечивать развитие зеленых рас-

тений”. К ним были отнесены рыхлые горные породы, переотложенные и сконструированные “почвогрунты”, а также “подводные донные образования, находящиеся на небольшой глубине”. Параллельно с В.М. Фридландом, тему объектов классификации почв и объектов почвоведения развивал Соколов [33, 34]. В качестве объектов почвоведения он предлагал выделять: 1) почвы — “самостоятельные субаэральные естественно-исторические тела, образующиеся на месте в результате преобразования под влиянием биоты и климата исходных почвообразующих минеральных пород”; 2) “полупочвы — тела, формирующиеся под влиянием процессов почвообразования и иных процессов, и исполняющие основную экологическую функцию почв” (сюда отнесены аллювиальные, вулканические, органогенные, примитивные и др. почвы); 3) “парапочвы — тела, образующие экзосферу Земли (геодерму) и выполняющие экологическую функцию почв, но почвами не являющиеся (полупочвы и обладающие плодородием непочвенные образования)”; 4) “экопочвы — тела, выполняющие биосферную экологическую роль почв (почвы и парапочвы)”. В.О. Таргульян [36] также предложил “расширение теоретической базы почвоведения”, включая внеземные тела, в которых происходит взаимодействие в системе среда—субстрат. Вместе с аналогичными телами они представляют собой “экзоны”, которые подразделяются на “ситоны, трансоны и трансситоны”, обозначающие 1) тела, в которых продукты взаимодействия остаются на месте; 2) тела, в которых они переносятся; 3) переходный вариант. Позднее [38] эта концепция была применена к поверхностным телам Марса. Е.А. Дмитриев [14] на основе работ В.О. Таргульяна предложил в понятие экзона включать почвы и “почвоподобные тела”, среди которых могут быть введены классы “организационно” (абиотичные экзоны с горизонтным строением), “функционально” (обладающие плодородием) и “хорологически” (занимающие место почв, например, каменистые россыпи) почвоподобных тел. При этом “границы между почвами и непочвами ... всегда будут иметь договорной характер”. К почвоподобным телам он отнес также коры выветривания и донные отложения.

Эти подходы опирались на вековой опыт человечества и постулаты почвоведения как науки с самого начала его становления. Судя по народным классификациям почв разных стран и континентов [63], люди с самого первого своего соприкосновения с почвой отделили не только важные при земледельческом использовании почвы, но и почвы различных неудобий, некоторые из которых мы могли бы сегодня отнести к экстремальным. Со становлением агрогеологии это продолжилось и в додокучаевский период — если

Ф. Фаллу разделял почвы коренные и наносные, то у Ф. Рихтгофена среди “областей почвообразования” появляются и “область господствующей денудации” и “область эродированных эоловых отложений” [15].

С самого начала генетического почвоведения В.В. Докучаев [16] выделял “нормальные – растительно-наземные” и “анормальные – наносные” почвы, а также переходные между ними. При дальнейшем развитии почвоведения менялись названия классов почв, увеличивалось их число, менялись приоритеты классификаций (подробно это изложено в работах [15, 63]), но до сих пор, например, в отечественной классификации, сохранилось разделение на большой ствол постлитогенных почв и малый ствол органогенных почв, где собственно и находятся все “нормальные” по Докучаеву почвы, а также меньшие стволы синлитогенных и слаборазвитых почв [21], где и находится большая часть почв, которые сегодня можно отнести к экстремальным.

В XXI веке информация о почвах и почвоподобных телах существенно возросла. Активно велись работы по почвам Антарктиды, в результате чего были опубликованы две интернациональные монографии [44, 46], развивались исследования органо-минерального взаимодействия на и внутри плотных пород – эпилитного и эндолитного выветривания [27, 48, 52, 54]. Существенным образом продвинулось изучение подводных и маршевых почв, в том числе и российскими учеными [19, 20, 40, 41, 72], а также почв, сформированных на субстратах со своеобразным химико-минералогическим составом [13, 23, 24]. Лавинообразно появляются данные по техногенным почвам и субстратам [3, 57, 75]. Кроме того, кардинальным образом изменились возможности оборудования по изучению детальных свойств вещества на микро- и наноуровнях (см. раздел “Методические подходы ...”).

В теоретическом плане также появились концепции почвенного эндемизма [45] и почвенных меньшинств [55], которые подчеркивали необходимость внимательного рассмотрения особых в различных отношениях почв, отличающихся от большинства. Было также осознано и систематизировано множество почв как естественного, так и антропогенного генезиса, объединенное под названием “первичных почв” [1].

На основании обобщения изложенного выше теоретического и эмпирического материала была сформулирована концепция “Почвоведения и географии почв экстремальных условий” [11], развитие которой и излагается в данной работе.

Почвы экстремальных условий не только оказываются на переднем крае науки, но и постепенно включаются в современные классификационные

системы. По оценке [63] в трех национальных почвенных классификациях учитываются плотные породы, а еще в пяти – мелководные объекты. В то же время во многих национальных классификациях до сих пор не акцептируются техногенные почвы и субстраты, а пахотные почвы классифицируются так же, как неизмененные. И только последняя версия WRB [59] учитывает все эти объекты как элементы классификационной системы, а четыре квалификатора: Nudilithic, Protic, Subaquatic, Yermic – напрямую относятся к экстремальным объектам классификации почв – на плотных породах, с недифференцированным на горизонты профилем, в условиях мелководий и пустынь.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ГЕНЕЗИСА И ГЕОГРАФИИ ПОЧВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Определяя критерии, по которым те или иные почвенные тела могут быть отнесены к почвам экстремальных условий, мы основываемся на “педоцентрическом” подходе, то есть оцениваем существующую и потенциальную степень развития профиля, а также, в качестве дополнительного признака, напряженность потоков вещества и энергии данной почвы. Нами предлагается выделять почвы экстремальных условий среды, которые, понимая некоторую жаргонность термина, в дальнейшем будем называть так же, как коллеги – почвенные микробиологи, предложившими термин “экстремальные почвы” для почв экстремальных условий [49].

Объекты. В последние десятилетия получен значительный материал по минералогии и геохимии поверхностных тел атмосферных (в основном, Марс) и безвоздушных (Луна, астероиды, кометы) космических объектов (см. обзоры в работах [38, 67]). Для них активно используется термин “soil” – Martian soil, Lunar soil, под которым понимается просто рыхлый неконсолидированный субстрат – реголит. Он возникает под действием таких факторов, как огромная амплитуда температур, метеоритная бомбардировка, солнечный ветер, космическое излучение [67]. Мы считаем, что научное докучаевское определение почвы нельзя расширять для полностью абиогенных объектов и предложили термин “солоид (soloid)” в качестве аналога длинного термина “почвоподобное тело” [38]. На основе данных, изложенных в предыдущем разделе, а также информации о продуктах взаимодействия среды и породы в космическом пространстве, была составлена шкала глубин взаимодействия в системе среда–субстрат на земных и внеземных объектах и определено место почв на ней (рис. 1). Как видно, взаимодействия осуществляются в весьма широком диапазоне – от десятков нанометров до первых

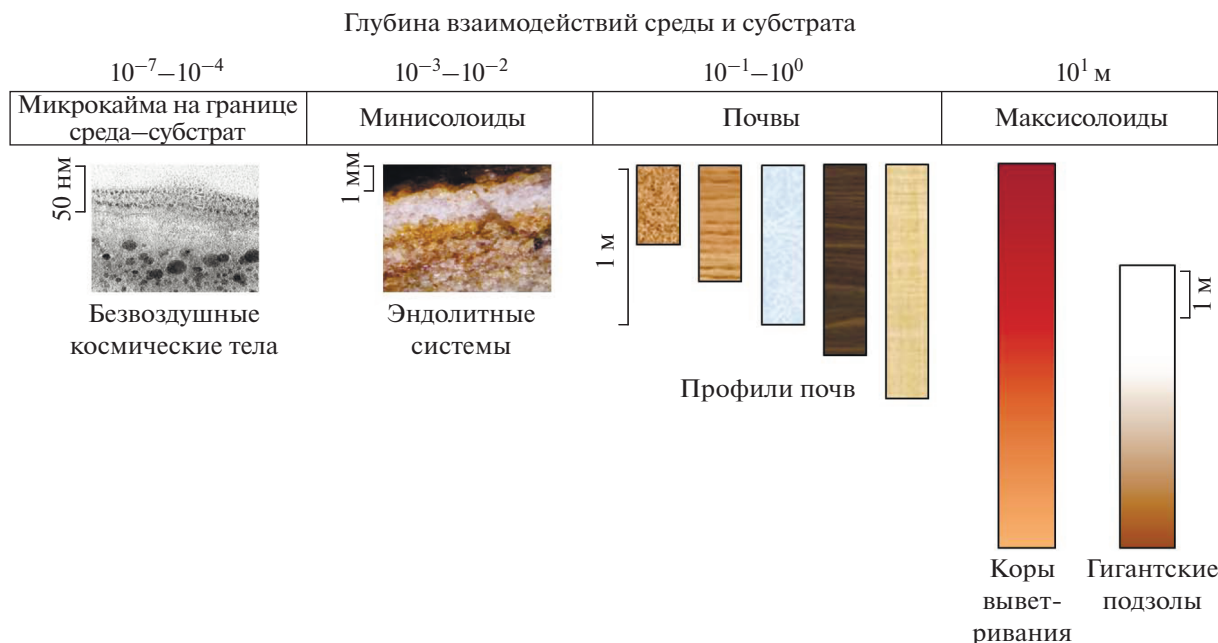


Рис. 1. Шкала глубин, обобщающая взаимодействия в системе среда-субстрат на земных и внеземных объектах и место почв на ней.

десятков метров. Однако мы считаем, что самостоятельные, то есть расположенные на границе среда-субстрат, а не внутри других объектов, природные результаты взаимодействия с глубиной менее 1 мм и невидимые невооруженным глазом не являются объектами почвоведения, даже имеющего дело с экстремальными условиями. Поэтому к объектам нашей науки мы предлагаем относить тела со следующими ограничениями.

Для почвы, в том числе экстремальной, необходимо наличие следующих признаков: 1) рыхлый дисперсный (размер частиц < 2 мм) минеральный и/или органический материал, мощностью $> n$ см, 2) горизонтная стратификация *in situ*, хотя бы на микроуровне и хотя бы на фоне седиментационной слоистости, 3) (микро)биота обязательна, 4) наличие органического вещества, хотя бы в следовых количествах, 5) преимущественно субаэральный или субаквальный режим под слоем воды ≤ 2 м.

Для солоида необходимо наличие следующих признаков: 1) рыхлый дисперсный (< 2 мм) минеральный и/или органический материал, хотя бы в следовых количествах, 2) горизонтная стратификация *in situ*, хотя бы и на фоне седиментационной слоистости на глубину $> n$ мм, 3) контакт со средой, представляющей собой вакуум, газообразную или жидкую фазы. При этом наличие биоты и органического вещества не обязательно.

Критерии отнесения объектов почвоведения к экстремальным предусматривают развитие почв и солоидов в экстремальных условиях Земли и эк-

зопланет как при недостатке ресурсов (вещества и энергии), так и при его избытке (рис. 2). Экстремальность, связанная с дефицитом или избытком ресурсов, определяется по отношению к “докучаевским” почвам нормальных/оптимальных условий, то есть природным телам, для которых разработаны методология исследования и классификационные системы современного почвоведения. Экстремальность в связи с дефицитом ресурсов является традиционной для экологии и биологии. Однако наш анализ показал, что для генезиса и географии почв операционально выделять и экстремальные объекты почвоведения при избытке ресурсов, так как и в этом случае формируются тела, например, коры выветривания и формирующиеся на них ферраллитные почвы, сильно отличающиеся от центральных объектов почвоведения. Они требуют особых подходов в связи с, например, низкой поглощающей активностью глин, очень высокой долей обменного алюминия и сильнокислой в связи с этим реакцией среды¹ [74].

В экстремальных условиях образуются орто-экстремальные почвы, то есть правильные, настоящие экстремальные, и параэкстремальные почвы, то есть почти экстремальные. Последние являются переходной формой от экстремальных к нормальным или оптимальным почвам. В ультраэкстремальных условиях образуются солоиды,

¹ Разумеется, только небольшую часть ферраллитных почв — с недифференцированным профилем — можно отнести к экстремальным.



Рис. 2. Доступность ресурсов и степень экстремальности объектов почвоведения.

которые при недостатке ресурсов формируются на микроуровне (например, в эндолитных системах [27]) – минисолоиды, а при их избытке – на макроуровне (метры и десятки метров) – максисолоиды, например, многометровые культурные слои, или урбоседименты [17], а также мощные коры выветривания и гигантские подзолы с элювиальным горизонтом в 5 м и более в условиях жаркого и влажного климата, действующего на субстраты в течение сотен тысяч лет.

Критериями ортоэкс-тремальных почв являются неразвитость профилей и/или стрессовое состояние биоценозов почв, а также, в качестве дополнительного признака, крайне малые напочвенные потоки углерод- и азотсодержащих газов. К ортоэкс-тремальным почвам мы относим почвы с неразвитым гумусовым и подстилочным горизонтом, относящимся по классификации России к псаммоземам, петроземам, в том числе карбо- и гипсо-петроземам, пелоземам, некоторым солончакам. Сюда же нами отнесены техногенно “отравленные” почвы, в которых морфоструктурные профили сохранены, а биофункциональное сильно редуцировано и не соответствует морфологическому облику. К параэкс-тремальным почвам могут быть отнесены, например, почвы ультраконтинентальных областей, в которых профиль полноразвитый, но про которые мы также знаем, что зимой их поверхность охлаждается до -50 – -60°C , но приводит ли это к каким-то отличиям от “докучаевских” почв и требуют ли эти почвы особых подходов к их исследованию – пока знаем недостаточно. Некоторые почвы, например, песчаные подзолы южной тайги, будучи сотни лет назад под селитьбами или пережившие периоды распашки, не могут восстановить исходные профили, находясь уже несколько сотен или даже тысяч лет под лесной растительностью [10]. В отличие от большинства почв, которые практически полностью восстанавливают свои профили при выводе из сельскохозяйственного оборота, эти измененные почвы тоже можно отнести к параэкс-тремальным.

Классы экстремальности почв. Пространственно-временной синтез полученных знаний о почвах экстремальных условий позволил выделить следующие классы экстремальности почв.

I. Факторная экстремальность почв – моно- и мультифакторная экстремальность, связанная с одним или несколькими факторами почвообразования (см. ниже).

II. Режимно-функциональная экстремальность почв. Она связана с формированием в какой-то период (сезон, год) экстремальных для конкретной территории, прежде всего, погодных условий. Как правило, это связано с отсутствием или избытком осадков, крайне высокими или крайне низкими для региона температурами, ледяным дождем и т. д. Например, экстремально жаркое и сухое лето 2003 г. в Западной Европе и 2010 г. в России оказало сильное влияние на потоки парниковых газов из почв [18, 51]. Этот класс экстремальности далеко не всегда, или даже редко связан с генезисом и географией почв и появлению собственно экстремальных почв.

III. Хорологическая (внеареальная) экстремальность типа почвообразования связана с появлением в почвенном покрове почв, которые обычно характерны для других территорий с иным климатом. Например, немецкими почвоведом на побережье Восточной Антарктиды были найдены почвы, по всем критериям международной системы WRB соответствующие подзолам (Podzols) [44], которые типичны для лесов и тундр. Другой пример был выявлен с нашим участием для вертисолей (Vertisols по WRB). Вертисоли в большинстве своем относятся к глинистым почвам тропиков и субтропиков с наличием чередования сухого и влажного периодов. Наиболее характерные условия их формирования характеризуются среднегодовой температурой 15 – 26°C , среднегодовым количеством осадков 500 – 1000 мм, продолжительностью сухого периода 3 – 7 мес. Однако анализ их географии показал, что в той или иной степени проявление вертикальных признаков возможно в широком ряду климатических условий, включая экстремальные – недавно вертисоли (Vertisols) были найдены и описаны в мерзлотной области Центральной Бурятии с отрицательной среднегодовой температурой [62].

IV. Возможно отнесение к отдельному классу экстремальности почв, развивающихся во время и после естественных и антропогенных ката-

строф [9], но этот вопрос пока достаточно не проработан.

Отдельно рассмотрим наиболее распространенную факторную экстремальность почв. Можно выделить ее следующие разновидности.

1. Климатически-экстремальные почвы (клима-экстремальные) — недостаточно обеспеченные теплом (регионы высоких широт) или влагой (засушливые регионы), территории с резкими колебаниями климатических условий [7, 44, 46].

2. Почвы, экстремальные в связи с рельефом (топо-экстремальные), неполноразвитость которых связана с местными условиями рельефа (пещеры, отвесные скалы и т. д.) [31].

3. Почвы, лимитированные по биоте — (био-экстремальные) — например, почвоподобные тела пещер, где полностью отсутствуют фотосинтезирующие организмы, или почвы под бескорневой растительностью [31, 46, 65].

4. Почвы, экстремальные в связи с субстратом (лито-экстремальные) — например, развивающиеся в токсичной среде [24] или на крайне бедной основе, что недостаточно обеспечивает благоприятные свойства и запас питательных веществ для развития биоты [30], а также в связи с крайне неблагоприятными физическими свойствами, например, высокой каменистостью и практическим отсутствием мелкозема.

5. Почвы, развитие которых лимитировано современным формированием отложений (седи-менто- или кратко седи-экстремальные) — эоловым, флювиальным, вулканическим и т. д., что было известно еще в додокучаевский период [15].

6. Почвы, сформировавшиеся под активным влиянием современных или прошлых эндогенных процессов (эндогенно-экстремальные) [4], а также биокосные образования в гидротермальных условиях [8].

7. Почвы, сильно подверженные действию поверхностных вод на днищах мелких водоемов, которые, согласно Мировой реферативной базе почвенных ресурсов [59], относятся к почвам и классифицируются как почвы (субакво-экстремальные) [19, 20, 72]. Возможно, в дальнейшем следует выделить отдельную разновидность экстремальности для почв, подверженных сильному воздействию грунтовых, в том числе засоленных, вод (гидро-экстремальные).

8. Почвы, сильно измененные или сформированные в связи с деятельностью человека (антропогенно-экстремальные) — почвы на культурных слоях, токсичных отходах и т. д. По подобным объектам данных очень много — проводятся циклы конференций [75], издаются обобщающие обзоры [3] и монографии [57], а также атласы [47] и учебные пособия [5]. Помимо специфических

морфо-химических свойств эти почвы зачастую характеризуются и особым функционированием, например, высоким запасом парниковых газов, способных к эмиссии при нарушении поверхности [32].

Весьма часто приходится иметь дело с мульти-факторной экстремальностью. Как правило, клима-экстремальные почвы одновременно являются лито-экстремальными из-за выноса мелкозема сильными ветрами или седи-экстремальными, связанными с эоловым привносом. Топо-экстремальность часто сочетается с лито-экстремальностью почв.

География почв экстремальных условий. На основании изложенных выше сведений о разнообразии экстремальных почв и солоидов, может создаться впечатление, что они вообще преобладают. Но это не совсем так. Оценить общую площадь экстремальных почв для мира можно по подсчетам площадей сделанных в Таксономии почв США [71] на основании прилагаемой карты “Global Soil Regions”, в свою очередь созданной на основе данных Почвенной карты Мира ФАО. К возможным ареалам солоидов следует отнести скалисто-каменистые выходы ~10% свободной ото льда суши, и, с большой степенью условности, движущиеся пески ~4%. К ареалам экстремальных почв следует отнести площади, занимаемые практически всеми Энтисолями (слаборазвитыми почвами) ~16%. Итого получается 30% внеледниковой площади суши для экстремальных почв и солоидов с недостатком ресурсов. Но если мы сюда добавим еще примерно пятую часть от 7% площади, занимаемой Оксисолями (недифференцированными тропическими почвами на корках выветривания), а также некоторую часть Гелисолой (мерзлотных почв), то общую долю экстремальных почв и солоидов в покрове Земли по подсчетам таксономии почв можно довести до 35%.

Однако это очень приблизительная и, на наш взгляд, сильно завышенная оценка, так как на карте “GlobalSoilRegions”, по которой и осуществлялись подсчеты, к выходам скал отнесен весь пояс гор Северо-Восточной и Южной Сибири, Тибет, Среднесибирское плоскогорье. Видимо, более точный подсчет площадей экстремальных почв на Земле еще впереди, но сегодня оценка в 20% общей площади внеледниковой суши представляется наиболее вероятной.

Основные ареалы экстремальных почв — это наиболее аридные пустыни — Сахара, Аравийская, Большая Австралийская, Калахари, а также наиболее сухие и холодные горные массивы в Азии, Арктике. С избытком ресурсов экстремальные почвы наибольшие ареалы имеют в бассейнах экваториальных рек — Амазонки и Конго. Са-

мые крупные ареалы принадлежат клима-, седи- и лито-экстремальным почвам.

В отдельных макрорегионах распространения экстремальных почв, например, в полярных областях Земли традиционно выделяемые законы глобальной географии почв, прежде всего, широтная зональность, нарушаются из-за воздействия ледников. Почвенный покров приобретает островное строение (“острова почв” среди морского и наземного льда), а его характер более зависит от локальных причин (навстрелное или подветренное положение, экспозиция, наличие или отсутствие птичьих базаров и стоков с них и т. д.), чем от широты местности. Такие закономерности предлагается назвать “мозаично-островным” географическим расположением почв [12].

Особенности поведения во времени и педогенной записи. Однозначно утверждать, что у экстремальных почв существует вполне определенная специфика их поведения во времени и педогенной записи [37] по сравнению с почвами оптимальных условий неправомерно. Однако у части почв с факторной экстремальностью такая специфика имеется.

У *клима-экстремальных почв* с недостатком ресурса (холодные и/или сухие условия) активное почвообразование происходит в очень короткие периоды оттаивания и увлажнения, поэтому “теплый возраст” арктических почв (длительность почвообразования при положительных температурах субстрата) может быть в 10 раз меньше возраста почв бесснежных районов, несмотря на одинаковый абсолютный возраст поверхности (рис. 3). Импульсный режим увлажнения почв высокой аридности может приводить к нескольким парадоксальным ситуациям, например, к ожелезнению массы, более характерному для почв гумидных областей [7]. Возраст почв высокой экстремальности, например, в Восточной Антарктиде составляет первые сотни лет, что связано с периодическим эрозионным сносом верхних горизонтов в наиболее теплые годы, когда наблюдается интенсивное таяние [78]. Что касается особенностей педогенной записи клима-экстремальных почв с недостатком ресурса, нужно констатировать медленный и неглубокий характер этой записи и наличие (крио)турбационной памяти — сохранение органического вещества на глубинах, консервация памяти о более влажных или теплых эпохах (табл. 1). А вот клима-экстремальные почвы с избытком ресурса и соответствующие макси-солоиды могут иметь возраст в сотни тысяч лет, и при очень длительном педогенезе ресурс минералов может быть полностью исчерпан, а запись стерта.

Топо-экстремальные почвы не могут иметь большой возраст, так как при накоплении в про-

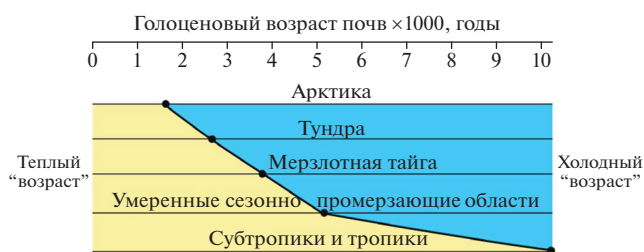


Рис. 3. Абсолютный возраст почв и реальная длительность почвообразования в различных зонах северного полушария (во внимание принята длительность тепло- и мерзлотного периода в течение каждого года).

цессе почвообразования некоторого количества мелкозема он под действием силы тяжести оказывается внизу [31]. Лишь солифлюкционные склоны могут иметь почвы с записью коротких циклов почвообразования.

Био-экстремальные почвы при недостатке ресурсов, как правило, имеют небольшой возраст, так как отсутствие корневой системы очень ослабляет их способность противостоять эрозии. Для них характерен малый объем записи, хотя процессы стабилизации органического вещества сходны с оптимальными условиями [65]. В некоторых случаях, например, для солоидов пещер запись хорошо отражается в соотношении стабильных изотопов [73].

Наибольшую специфику поведения во времени имеют *лито-экстремальные почвы*, причем в зависимости от субстрата, эта специфика может выражаться по-разному. В целом, отсутствие мелкозема, очень бедный или токсичный субстрат приводят к угнетению биоты и, соответственно, слабому развитию почв с малыми объемами педогенной записи. Однако имеются и отдельные случаи развития многообразного почвообразования и выветривания со сложным минералогическим строением, например, при экзотермической реакции окисления сульфидов [23]. Почвообразование на гипсах и некоторых известковых породах может иметь иную траекторию, чем большинство почв, для которого, как известно, характерно затухание процессов со временем. На плотных гипсах, наоборот, сначала выветривание плотных пород идет медленно, а потом начинает ускоряться по мере развития трещинной сети и увеличения площади соприкосновения субстрата и почвенной влаги [35].

Про *эндогенно-экстремальные* почвы и педогенную запись в них известно пока очень мало, а вот три оставшихся разновидности — *седи-экстремальные*, *субакво-экстремальные* и *антропогенно-экстремальные* почвы — в плане педогенной записи имеют сходные черты. При недостатке ресурсов, то есть частых и сильных нарушениях, пе-

догенная запись близка к нулю, а при избытке ресурсов для них характерна книгоподобная (слой за слоем) запись [37] о катастрофах, сукцессиях растительности, процессах на водосборе, антропогенной деятельности, хотя собственно педогенной записи мало (табл. 1).

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ПОЧВ И ПОЧВОПОДОБНЫХ ТЕЛ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Особенности методических подходов к субстантивному изучению почв и солоидов экстремальных условий среды заключаются в трех основных аспектах: 1) обеспечение соответствия разрешающей способности инструментальных методов исследования вещества масштабу органо-минеральных взаимодействий, происходящих в таких объектах; 2) неприменимость традиционных методов анализа вещества, разработанных для большинства почв с кварц-силикатной основой, для почв на специфических субстратах, например, невозможность гранулометрического анализа на гипсах [13], завышенные значения поглощенного магния в почвах на ультраосновных породах [24], неадекватные значения кислотной вытяжки в сульфидосодержащих экстремально кислых почвах [22]; 3) неопределенность изменений свойств экстремальных почв, в том числе биологических при помещении их в условия температуры и влажности и окислительные условия, которые они никогда не испытывали ранее, например, почвы Антарктиды при 20°C, или субарктические почвы в окислительной обстановке лаборатории.

Первый аспект, прежде всего, касается почвенных тел, которые функционируют в условиях экстремального дефицита ресурсов – вещества, энергии и времени. Образование новых твердофазных продуктов выветривания в единицу объема за единицу времени в них очень невелико. Поэтому возникает методическая проблема – достоверно идентифицировать результаты органо-минеральных взаимодействий классическими методами почвоведения в дефицитных-ресурсных природных телах удастся лишь при достаточно длительном времени их функционирования в квазистационарных условиях ($>n \times 10^2$ лет). Это нечастый случай для регионов с экстремальными условиями среды, где поверхности нарушаются турбационными и эрозионными процессами. В экстремальных почвах с дефицитом ресурсов и солоидах вертикальный масштаб элементарных почвообразовательных процессов (ЭПП) небольшой, диагностические ЭПП реализуются преимущественно на микроуровне. Это отличает такие объекты от нормальных почв и тем более экстремальных почв с избытком ресурсов, для установле-

ния генезиса которых часто достаточно диагностики ЭПП по морфологическим, химическим и физико-химическим показателям на макро- и мезоуровнях.

Даже совсем небольшие навески (около 1 мг) характеризуют объем порядка 1 мм³ и обладают пространственным разрешением при отборе из нативного образца около 1000 мк, что недостаточно для выявления некоторых ЭПП в почвах и солоидах с дефицитом ресурсов. Применение таких важных в современном почвоведении методов познания структурного состояния вещества, как ¹³C ЯМР-спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ сталкивается с методическими проблемами при работе со сверхмалыми навесками и соответственно не всегда обеспечивают высокое пространственное разрешение. Это верно и для методов химического фракционирования, работающих с большими навесками и, более того, способными привести к существенной трансформации вещества на субмикроуровне. В таких условиях электронная микроскопия, прежде всего растровая, в сочетании с анализом характеристических рентгеновских спектров элементов, является методом выбора; она стала сейчас практически рутинной технологией при исследовании вещества, и что немаловажно, *in situ*, без отбора навесок. Однако из-за особенностей почвенных объектов и пробоподготовки не всегда удается достичь количественного элементного анализа, а разрешение остается на микронном уровне. Кроме того, этот метод не дает информации о структурном состоянии вещества, а также его изотопном составе.

В последнее время в почвоведении все шире применяется вторично-ионная масс-спектрометрия высокого разрешения (NanoSIMS), которая позволяет определять *in situ* элементный и изотопный состав органо-минеральных соединений с точностью масс-спектрометрии [66]. NanoSIMS стала важным дополнением к электронной микроскопии. По сравнению с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDX), которая наиболее часто применяется для анализа состава образца, наблюдаемого в электронном микроскопе, благодаря масс-спектрометрии удалось скорректировать набор элементов, определяемых с высокой точностью и разрешением. Хорошая чувствительность NanoSIMS по отношению к таким элементам, как углерод и азот, позволила значительно продвинуться в понимании механизмов органо-минеральных взаимодействий и стабилизации органических соединений в почве на субмикроуровне, а также визуализировать органические и органо-минеральные образования (точнее, их состав) с ранее недоступной детальностью, например, в ризосфере [76], в системах микроорга-

Таблица 1. Соотношения общих и специфических характеристик записи информации в разных типах факторной экстремальности почв при недостатке и избытке ресурсов

Тип факторной экстремальности	Недостаток или избыток ресурса	Общие характеристики записи	Специфические характеристики записи
Климатическая (клима-)экстремальность	Недостаток	Медленная запись, неглубокая проработка минеральной массы, низкая устойчивость к последующему потеплению или увлажнению климата	Криотурбационная память – сохранение органического вещества на глубинах, консервация памяти о более влажных или теплых эпохах
	Избыток	Многометровые солоиды (коры выветривания) с огромным объемом памяти, быстрая запись, глубокая проработка минеральной массы	При очень длительном педогенезе ресурс минералов может быть полностью исчерпан, а запись стерта
Топо-экстремальность	Недостаток	Быстрое стирание записи, малоинформативный вариант	В случае солифлюкции короткие циклы педогенеза могут записываться
Биотическая (био)-экстремальность	Недостаток	Малый объем записи, хотя процессы стабилизации органического вещества сходны с оптимальными условиями	Запись хорошо отражается в соотношении стабильных изотопов
Лито-экстремальность	Недостаток	Очень малый объем записи, так как не на чем записывать, хотя могут быть и другие варианты – все сильно зависит от субстрата	Почвенные процессы часто очень специфичны, и запись о них необычна
Седименто-(седи-)экстремальность	Недостаток	Очень малый объем записи из-за краткости экспонирования	Преобладает книгоподобная запись о геоморфологических и эндогенных (вулканизм) процессах
	Избыток	Очень большой объем записи, причем не только инситу, но и аккумуляция информации об окружающей территории	Преобладает книгоподобная запись о катастрофах, сукцессиях растительности и т. д., хотя собственно педогенной записи мало
Субакво-экстремальность	Недостаток	Быстрая перезапись в условиях окислительной обстановки	Преобладает короткая книгоподобная запись о штормах и волнениях
	Избыток	Длительная и подробная запись о длительных этапах	Преобладает книгоподобная запись о процессах на водосборе и внутри самих отложений
Антропогенно-экстремальность	Недостаток	Малый объем записи из-за заторможенности процессов	Много информации о собственно антропогенной деятельности
	Избыток	Очень большой объем записи о специфическом педогенезе и об антропогенной деятельности	Основной источник археологической информации, хорошо законсервированной в этом типе

низм—минерал [65], глинистые минералы—органическое вещество [56], (гидр)оксиды железа—органическое вещество [61] и др. Метод позволяет получить новую информацию о механизмах формирования микроагрегатов, например в ходе первичного почвообразования вскоре после отступления ледника [69].

Одним из самых впечатляющих достоинств NanoSIMS является возможность изучать пространственное распределение стабильных изотопов и их отношений на субмикронном уровне.

Еще один подход, который может быть взят на вооружение для изучения экстремальных почв и почвоподобных тел с дефицитом ресурсов — исследование околопороговой тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения с использованием источников синхротронного излучения (NEXAFS), дающее информацию о структурном состоянии вещества. Например, в комбинации со сканирующей просвечивающей рентгеновской микроскопией (STXM) этот метод позволяет картографировать структурные группы органических соединений на субмикронном уровне [64]. В результате можно выявить особенности пространственного распределения алифатических, ароматических, карбоксильных и других структурных групп органического вещества на поверхности и во взаимодействии с минеральной частицей. Это дополняет карты химических элементов, получаемые, например, при энергодисперсионном или волнодисперсионном рентгеновском микроанализе. В сочетании с NanoSIMS такой комплекс методов дает представление о пространственном распределении химических элементов, структурных групп и стабильных изотопов в органических и органо-минеральных соединениях с субмикронным разрешением.

Для относительно простых систем — солоидов, формирующихся преимущественно под воздействием микроорганизмов (под биоматами, в гиполитных и эндолитных нишах), перспективно изучение индивидуальных органических и неорганических компонентов методом рамановской спектроскопии [60]. Важно, что этот метод позволяет исследовать микробные биогеосистемы в нарушенном состоянии, имеет высокое разрешение и дает прямое представление о молекулах веществ, участвующих в функционировании, а не только об их элементном составе.

В качестве неразрушающего метода изучения строения экстремальных почв и солоидов с микропрофилями незаменим метод рентгеновской компьютерной микротомографии [65, 70], а для визуализации гетерогенного строения таких тонких структур как биопленки [68] и органо-минеральные кутаны — конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Последняя также позволя-

ет оценивать распределение значений рН на микроуровне при обработке образца рН-чувствительными органическими красителями, как это делается, например, при изучении биохимического выветривания минералов [42].

Применение ускорительной масс-спектрометрии для определения малых концентраций ^{14}C открывает возможности для оценки возраста крайне лимитированных по ресурсам солоидов, например, в Антарктиде, при содержании углерода в сотые доли процента [78].

Описанные методические подходы, по нашему мнению, раздвигают границы знания о составе и состоянии вещества в экстремальных почвоподобных телах с недостатком ресурсов. Последние являются относительно простыми системами и могут служить моделями для опробования передовых методик тонкого исследования вещества, прежде чем они будут перенесены на гораздо более сложные объекты — нормальные почвы неэкстремальных сред.

Ниже систематизированы некоторые подходы, которые на наш взгляд являются приоритетными при изучении органо-минеральных взаимодействий *in situ* в почвенных объектах с микропрофилями (табл. 2).

Что касается применения нестандартных химических и биологических методов для исследования экстремальных почв в связи с составом субстратов и низкими значениями температурами и влажности, то здесь существует еще много задач разработки специальных методов изучения таких объектов для специалистов в области химии и биологии почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время многие почвоведы осознают, что объектами их науки являются не только нормальные почвы, для которых разработан методологический и методический аппарат исследований и классификация, но и природные тела, которые занимают место этих почв в почвенном покрове, но иногда довольно сильно от них отличаются. И это связано, в основном, с особенностями факторов почвообразования. Однако в качестве какого-либо единства эти специфические объекты ранее не рассматривались. Предлагается новое научное направление — генезис и география почв экстремальных условий (*extreme pedology*). Его объектами являются почвы и солоиды (почвоподобные тела), которые развиваются в экстремальных (крайних, необычных для нормальных почв) условиях, как при недостатке, так и при избытке ресурсов.

Предлагается выделять различные классы экстремальности почв и солоидов — факторную, ре-

Таблица 2. Некоторые методы изучения почв и почвоподобных тел, формирующихся в условиях экстремального дефицита ресурсов

Метод	Информация	Разрешение*	Особенности применения
Сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM-EDX/ESEM-EDX)	Морфология поверхности, элементный состав	Морфология: $n \times 1$ нм; состав: 1 μ м	Детальная визуализация поверхностных слоев образца, идентификация компонентов по элементному составу; в ряде случаев затруднены анализ в объеме $<1 \mu\text{м}^3$, а также идентификация C- и N-содержащих компонентов
Вторично-ионная масс-спектрометрия высокого разрешения (NanoSIMS)	Элементный и изотопный состав (оценка по составу вторичных ионов)	>100 нм	Высокое разрешение при высокой чувствительности, в том числе к углероду и азоту; оценка отношений стабильных изотопов; одновременно можно определять не более 7 либо отрицательно заряженных, либо положительно заряженных ионов; разрушающий метод, трудоемкая подготовка образцов
Рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния света)	Состав индивидуальных органических и неорганических компонентов	1 μ м	Идентификация биомолекул и минералов, изучение объекта на микроуровне в ненарушенном состоянии без предварительной механической или химической обработки (даже без напыления)
Сканирующая просвечивающая рентгеновская микроскопия (STXM) в комбинации с исследованием околопороговой тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения (NEXAFS)	Молекулярная структура, функциональные группы	50 нм	Пространственная локализация структурных компонентов органического вещества, включая локализацию макромолекулярных компонентов биопленок; возможность изучения полностью гидратированных биомолекул; мягкое рентгеновское излучение взаимодействует практически со всеми элементами, что позволяет картографировать многие химические вещества на основе данных о структуре связи; метод доступен в лабораториях с источниками синхротронного излучения
Рентгеновская компьютерная микротомография (μ СТ)/Рентгеновская микротомография на синхротронном излучении	Строение образца	$>0.7 \mu$ м	Количественная оценка элементов строения объекта, в особенности порового пространства, построение трехмерных моделей организации объекта, функциональная оценка гидрофизических свойств, идентификация минералов; неразрушающий, неинвазивный метод. При использовании синхротронного излучения лучше пространственное разрешение/проникающая способность/детализация, возможно исследование строения биопленок и процессов образования биоминералов
Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM)	Строение образца	250 нм	Оценка гетерогенного строения по серии изображений на различных глубинах фокальной плоскости внутри образца с последующей трехмерной реконструкцией; трехмерная визуализация биопленок и органо-минеральных кутан на минеральных частицах, а также внутри пор

* Приведено латеральное пространственное разрешение, которое достижимо на практике при исследовании органо-минеральных соединений.

жимно-функциональную и хронологическую (внеареальную) экстремальность. Среди класса факторной экстремальности определены клима-, топо-, био-, лито-, эндогенно-, седименто- или (седи-), субакво- и антропогенно-экстремальные почвы.

Пока существует множество нерешенных проблем в предлагаемом направлении почвоведения. Например, неясно, нужно ли относить к экстремальным почвы, слабое развитие которых связано исключительно с их молодым возрастом, а также куда следует относить почвы пост-катастрофического развития. Очень слабо разработаны классификационные подходы к экстремальным почвам и, в особенности, к солоидам.

Почвы, которые можно отнести к экстремальным, по нашей оценке, составляют ~20% площади внеледниковой суши. Это области наиболее аридных пустынь, гор с холодным и/или очень сухим климатом, а также некоторые почвы в бассейнах рек Амазонки и Конго. В областях Высокой Арктики и в Антарктике для почвенного покрова характерна не широтная зональность, а “мозаично-островное” географическое расположение почв.

Морфоаналитическое изучение почв и солоидов экстремальных условий требует особых методических подходов с применением современных технологий. Кроме того, требуется разработка новых методов химии и биологии почв для корректного исследования некоторых почв экстремальных условий, которые в естественной среде никогда не испытывали значений температуры и влажности, которые имеются в аналитических лабораториях.

Осознание экстремальности значительного числа объектов почвоведения и их дальнейшее адекватное исследование будет способствовать развитию теоретического и методического направлений нашей науки, что положительно скажется и на изучении основных, неэкстремальных почв Земли.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-27-00133 – концептуальное обобщение), РФФИ (проект 16-04-01776 – методологическое обеспечение) и РФФИ-РГО (проект 17-05-41157 – географические аспекты исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В.* Первичные почвы в природных и антропогенных экосистемах. Дис. ... докт. биол. н. Тольятти, 2012. 538 с.
2. *Александровский А.Л.* Палеопедогенез в экстремальных климатических условиях позднеледниковья и голоцена // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 6–11.
3. *Артамонова В.С., Бортникова С.Б.* Почвоподобные образования техногенных ландшафтов: история изучения, терминология, современные аспекты (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 4–13.
4. *Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернянский С.С., Пиковский Ю.И.* Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии // Почвоведение. 2007. № 6. С. 661–675.
5. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
6. *Глазовская М.А.* Влияние микроорганизмов на процессы выветривания первичных минералов // Изв. АН Казах. ССР. Сер. почвов. 1950. Вып. 6. С. 79–100.
7. *Голованов Д.Л., Лебедева-Верба М.П., Дорохова М.Ф., Слободкин А.И.* Микроморфологическая и микробиологическая характеристика элементарных почвообразовательных процессов в пустынных почвах Монголии // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1450–1460.
8. *Гольдфарб И.Л.* Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки). Дис. ... канд. геогр. н. М., 2005. 175 с.
9. *Гольева А.А.* Почвы катастроф как частный случай почвообразования в экстремальных условиях // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны. VII съезд Общества почвоведов им В.В. Докучаева. М.–Белгород, 2016. Т. 2. С. 258–259.
10. *Гольева А.А., Бондарева Ю.А.* Почвы археологических памятников в лесной зоне как почвы катастроф // Лесоведение. 2017. № 3. С. 205–211.
11. *Горячкин С.В.* Почвоведение и география почв экстремальных условий – проблемы и перспективы развития // Комплексные научные исследования и сотрудничество в Арктике: взаимодействие вузов с академическими и отраслевыми научными организациями. Мат-лы Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск: С(А)ФУ, 2015. С. 79–82.
12. *Горячкин С.В., Долгих А.В., Мергелов Н.С.* Почвы островов Земли Франца Иосифа: география, морфогенетические особенности, классификация и роль в углеродном цикле // Комплексная научно-образовательная экспедиция “Арктический плавучий университет – 2017”. Архангельск: КИРА, 2017. С. 15–36.
13. *Горячкин С.В., Спиридонова И.А., Седов С.Н., Таргульян В.О.* Северотаежные почвы на плотных гипсах: морфология, свойства, генезис // Почвоведение. 2003. № 7. С. 773–785.
14. *Дмитриев Е.А.* Почва и почвоподобные тела // Почвоведение. 1996. № 3. С. 310–319.
15. *Добровольский Г.В., Трофимов С.Я.* Систематика и классификация почв (история и современное состояние). М., 1996. 80 с.

16. *Докучаев В.В.* Главные моменты в истории оценок земель Европейской России, с классификацией русских почв // Мат-лы к оценке земель Нижегородской губернии. Естественно-историческая часть. СПб., 1886. Вып. 1.
17. *Долгих А.В., Александровский А.Л.* Почвы и культурный слой Великого Новгорода // Почвоведение. 2010. № 5. С. 515–526.
18. *Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Гитарский М.Л., Блинов В.Г. (ред.)*. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
19. *Ивлев А.М., Нестерова О.В.* К вопросу об изучении аквапочв // Вестн. ДВО РАН. 2004. № 4. С. 47–52.
20. *Касимов Н.С., Касатенкова М.С., Ткаченко А.Н., Лычагин М.Ю., Крооненберг С.Б.* Геохимия лагуно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия. М.: АПР, 2016. 64 с
21. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
22. *Красильников П.В., Фомин О.К.* Механизмы необменного поглощения калия и натрия экстремально кислыми почвами таежной зоны // Почвоведение. 2000. № 7. С. 808–813.
23. *Красильников П.В., Шоба С.А.* Сульфатнокислые почвы Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Карельский научн. центр РАН, 1997. 160 с.
24. *Лесовая С.Н., Горячкин С.В., Полюховский Ю.С.* Почвообразование и выветривание на ультраосновных породах горных тундр массива Рай-Из, Полярный Урал // Почвоведение. 2012. № 1. С. 44–56.
25. *Макеев А.О.* Поверхностные палеопочвы лессовых водоразделов Русской равнины. М.: Молнет, 2012. 300 с.
26. *Макеев А.О.* Экологическая роль палеопочв в геологической истории Земли // Почвы в биосфере и жизни человека. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. С. 183–283.
27. *Мергелов Н.С., Горячкин С.В., Шоркунов И.Г., Заповская Э.П., Черкинский А.Е.* Эндолитное почвообразование и скальный “загар” на массивно-кристаллических породах в Восточной Антарктике // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1027–1044.
28. *Полынов Б.Б.* Кора выветривания. Л.: Изд-во Академии наук СССР. 1934. 243 с.
29. *Полынов Б.Б.* Первые стадии почвообразования на массивно-кристаллических породах // Почвоведение. 1945. № 7. С. 327–339.
30. *Семиколенных А.А., Спиридонова И.А., Туюкина Т.Ю., Пучнина Л.В., Шаврина Е.В., Горячкин С.В.* Экстремальные экосистемы и почвы открытых гипсово-карстовых ландшафтов тайги Европейского Севера. М.: Медиа-Пресс, 2015. 208 с.
31. *Семиколенных А.А., Таргульян В.О.* Почвоподобные тела автохемолитотрофных экосистем пещер хребта Кугитангтау (Восточный Туркменистан) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 658–672.
32. *Смагин А.В., Долгих А.В., Карелин Д.В.* Экспериментальные исследования и физически обоснованная модель эмиссии диоксида углерода из вскрытого культурного слоя в Великом Новгороде // Почвоведение. 2016. № 4. С. 489–495.
33. *Соколов И.А.* Базовая субстантивно-генетическая классификация почв // Почвоведение. 1991. № 3. С. 107–121.
34. *Соколов И.А.* Что такое почва и что такое почвоведение? // Теоретические проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: Гуманитарные технологии, 2004. С. 9–22.
35. *Спиридонова И.А., Горячкин С.В.* Денудация поверхности и выветривание гипса в холодном гумидном климате и их влияние на почвообразование // Докл. междунар. конф. “Карстовые системы Севера в меняющейся среде”, 5–10 сент. 2011, Голубино-Пинега, Архангельская обл., Россия, 2011. С. 91–95.
36. *Таргульян В.О.* Экзогенез и педогенез: расширение теоретической базы почвоведения // Вестник МГУ. Сер. 17, почвовед. 1983. № 3. С. 33–43.
37. *Таргульян В.О., Горячкин С.В. (ред.)*. Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропо-сферных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
38. *Таргульян В.О., Мергелов Н.С., Горячкин С.В.* Почвоподобные тела на Марсе // Почвоведение. 2017. № 2. С. 205–218.
39. *Фридланд В.М.* Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. 242 с.
40. *Цейц М.А., Добрынин Д.В.* Морфогенетическая диагностика и систематика маршевых почв Карельского Беломорья // Почвоведение. 1997. № 4. С. 41–46.
41. *Шляхов С.А., Костенков Н.М.* Классификация и морфологические особенности почв равнинных морских побережий // Почвоведение. 1998. № 10. С. 1157–1163.
42. *Barker W.W., Welch S.A., Chu S., Banfield, J.F.* Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering // American Mineralogist. 1998. V. 83. P. 1551–1563.
43. *Belnap J., Budel B., Lange O.L.* Biological soil crust: characteristics and distribution // Ecol. Stud. 2003. V. 150. P. 3–30.
44. *Beyer L., Boelter M. (eds.)* Geocology of Antarctic ice-free coastal landscapes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 427 p.
45. *Bockheim J.G.* Soil endemism and its relation to soil formation theory // Geoderma. 2005. V. 129. P. 109–124.
46. *Bockheim J.G. (ed.)*. The soils of Antarctica. Springer, 2015. 322 p.
47. *Charzyński P., Markiewicz M., Świtoniak M.* Technogenic soils atlas. Polish society of soil science. Toruń, 2013.
48. *Chen J., Blume H.P., Beyer L.* Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review // Catena. 2000. V. 39. P. 121–146.
49. *Dion P., Nautiyal C. (eds.)*. Microbiology of Extreme Soils. Springer. 2008. 369 p.
50. *Dorn R.I.* Rock Coatings. In Treatise on Geomorphology. Elsevier Inc., 2013. V. 4. P. 70–97.

51. *Fiedler S., Lamers M., Ingwersen J., Streck T., Stahr K., Jungkunst H.F.* Impact of the heatwave in 2003 on the summer CH₄ budget of a spruce forest with large variation in soil drainage: A four-year comparison (2001–2004) // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2008. V. 171. Iss. 5. P. 666–671.
52. *Friedmann E.I.* Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert // *Science.* 1982. V. 215. P. 1045–1053.
53. *Giardino J.R., Houser C. (eds.)* Principles and Dynamics of the Critical Zone. Developments in Earth Surface Processes. Elsevier, 2015. V. 19. 674 p.
54. *Gorbushina A.A.* Life on the rocks // *Environ. Microbiol.* 2007. V. 9. P. 1613–1631.
55. *Goryachkin S.V.* Soil minorities – How should we classify them in WRB and other classification systems? // *Soil Classification 2004. International conference and field workshop. Book of Abstracts.* Petrozavodsk, 2004. P. 22–23.
56. *Heister K., Höschen C., Pronk G.J., Mueller C.W., Kögel-Knabner I.* NanoSIMS as a tool for characterizing soil model compounds and organomineral associations in artificial soils // *J. Soils and Sediments.* 2012. V. 12(1). P. 35–47.
57. *Howard J.* Anthropogenic Soils. Springer International Publishing, 2017.
58. *Hurst C.J. (ed.)* Their World: A Diversity of Microbial Environments. Advances in Environmental Microbiology. Springer, 2016. 396 p.
59. *IUSS Working Group WRB.* World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome, 2014.
60. *Jorge-Villar S.E., Edwards H.G.* Microorganism response to stressed terrestrial environments: a Raman spectroscopic perspective of extremophilic life strategies // *Life.* 2013. V. 3. P. 276–294.
61. *Keiluweit M., Bougoure J.J., Zeglin L.H., Myrold D.D., Weber P.K., Pett-Ridge J., Kleber M., Nico P.S.* Nano-scale investigation of the association of microbial nitrogen residues with iron (hydr)oxides in a forest soil O-horizon // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. V. 95. P. 213–226.
62. *Kovda I., Goryachkin S., Lebedeva M., Chizhikova N., Kulikov A., Badmaev N.* Vertic soils and vertisols in cryogenic environments of southern Siberia, Russia // *Geoderma.* 2017. V. 288. P. 184–195.
63. *Krasilnikov P., Ibañez Marti J.-J., Arnold R., Shoba S. (eds.)* Handbook of soil terminology, correlation and classification. London: EARTHSCAN, 2009. 448 p.
64. *Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Dathe L., Wirick S., Jacobsen C.* Spatial complexity of soil organic matter forms at nanometre scales // *Nature Geoscience.* 2008. V. 1. P. 238–242.
65. *Mergelov N., Mueller C.W., Prater I., Shorkunov I., Dolgikh A., Zazovskaya E., Shishkov V., Krupskaya V., Abrosimov K., Cherkinsky A., Goryachkin S.* Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth // *Scientific Reports.* 2018. V. 8. P. 1–15.
66. *Mueller C.W., Weber P.K., Kilburn M.R., Hoeschen C., Kleber M., Pett-Ridge J.* Advances in the analysis of biogeochemical interfaces: NanoSIMS to investigate soil microenvironments // *Advances in agronomy.* 2013. V. 121. P. 1–46.
67. *Pieters C.M., Noble S.* Space weathering on airless bodies // *J. Geophysical Research: Planets.* 2016. V. 121. № 10. P. 1865–1884.
68. *Rodriguez S.J., Bishop P.L.* Three-dimensional quantification of soil biofilms using image analysis // *Environmental Engineering Science.* 2007. V. 24. P. 96–103.
69. *Schweizer S.A., Hoeschen C., Schlüter S., Kögel-Knabner I., Mueller C.W.* Rapid soil formation after glacial retreat shaped by spatial patterns of organic matter accrual in microaggregates // *Global change biology.* 2018. V. 24(4). P. 1637–1650.
70. *Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Gerke K.M., Korost D.V., Romanenko K.A., Belokhin V.S., Dembovetskii A.V.* Tomography in soil science // *Byul. Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva.* 2016. Вып. 86. P. 28–34.
71. *Soil Survey Staff.* Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2-nd edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation, 1999.
72. *Tkachenko A.N., Gerasimova M.I., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B.* Bottom sediments in deltaic shallow-water areas – are they soils? // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. № 3. P. 39–52.
73. *Turchinskaya S.M., Semikolennykh A.A.* The details of carbon isotope profiles formation in soil-like bodies under the communities of phototrophs in karst caves // *Practical Geography and XXI Century Challenges. International Scientific and Practical Conference, 4–6 June 2018, Moscow. Conference Book.* M.: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 2018. P. 697–698.
74. *van Wambeke A.* Criteria for classifying tropical soils by age // *J. Soil Science.* 1962. V. 13. P. 124–132.
75. *Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z., Prokofeva T.V., Morel J.L., Ananyeva N.D. (eds.)* Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services. Proceedings of the 9th SUITMA Congress. Springer International Publishing, 2019.
76. *Vidal A., Hirte J., Bender F., Mayer J., Gattinger A., Höschen C., Schädler S., Iqbal T.M., Mueller C.W.* Linking 3D soil structure and plant-microbe-soil carbon transfer in the rhizosphere // *Frontiers in Environmental Science.* 2018. V. 6. P. 9.
77. *Weber B., Büdel B., Belnap J. (eds.)* Biological soil crusts: an organizing principle in drylands. Springer International Publishing, 2016.
78. *Zazovskaya E., Mergelov N., Shishkov V., Dolgikh A., Miamin V., Cherkinsky A., Goryachkin S.* Radiocarbon Age of Soils in Oases of East Antarctica // *Radiocarbon.* 2017. V. 59(2). P. 489–503.

Extreme Pedology: Elements of Theory and Methodological Approaches

S. V. Goryachkin^{a, *}, N. S. Mergelov^a, and V. O. Targulian^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: goryachkin@igras.ru*

Extreme environmental conditions that occur in Arctic, Antarctic, high mountains, extremely arid regions, as well as in toxic or nutrient-poor substrates, shallow waters, under intense anthropogenic impact, and in specific atmosphere or its absence in extraterrestrial systems, lead to the formation of soils and soloids (soil-like bodies) that cannot be adequately described, and their genesis and geography cannot be satisfactorily explained within the framework of the traditional Dokuchaev's pedology. A new scientific direction is proposed—extreme pedology (genesis and geography of soils in extreme environments), which requires its own theory, conceptual apparatus, and methodological basis. It is based on the assumption that soils and soloids can develop in extreme conditions under the deficit or surplus of resources. In the first case, soloids are just few millimeters thick; in the second case, they have the profiles of multimeter scale. Various classes of soils and soloids extremity are specified: factorial, regime-functional, and chorological (extra-areal) extremities. The behavior of extreme objects in time and the nature of their pedogenic records can have both specific and common features with normal soils. Morphological and analytical study of soils and soloids of extreme environments requires state-of-the-art methodological approaches and scientific equipment.

Keywords: deserts, Polar regions, high mountains, caves, endoliths, extraterrestrial soil-like bodies, anthropogenic soils, weathering crusts