

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.44.065

НА ПУТИ К “НОВОЙ ГЕОГРАФИИ ПОЧВ”: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ (ОБЗОР)

© 2019 г. П. В. Красильников^{1,2, *}, В. О. Таргульян³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12

²Институт биологии КарНЦ РАН, Россия, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

³Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 7

*e-mail: krasilnikov@ecfs.msu.ru

Поступила в редакцию 11.09.2018 г.

После доработки 24.09.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Рассматривается современное состояние географии почв и перспективные направления почвенно-географических исследований. Упоминаются новые идеи в рамках структурного подхода, как берущие начало в классическом учении о структуре почвенного покрова, так и основанные на количественной оценке почвенного разнообразия, теории графов и геостатистическом анализе пространственной неоднородности. Отмечается роль цифровой почвенной картографии в развитии почвенно-географической теории и практики; подчеркивается, что цифровая почвенная картография является методом и не способна заменить географию почв. Делается вывод о необходимости интеграции математических методов в традиционную географию почв, отмечается, что даже в цифровом земледелии расчет почвенных свойств и режимов основан на почвенно-географических моделях. Рассматривается необходимость адекватного отражения полигенетичных почв в почвенном покрове, рекомендуется использовать как палеогеографические данные, так и современные дистанционные методы и геофизическую съемку. Отмечаются трудности с прогнозом пространственного распределения антропогенно-измененных почв, обсуждается возможность шире использовать исторические и экономико-географические данные. В заключении предлагается развивать “новую географию почв” не только путем включения математических методов, но и большей интеграции со смежными науками.

Ключевые слова: структура почвенного покрова, педометрика, полигенетичные почвы, антропогенно-трансформированные почвы, цифровое земледелие

DOI: 10.1134/S0032180X19020096

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальная задача географии почв — анализ причин неоднородности почвенного покрова, отображение и прогноз свойств почв в географическом пространстве и создание геофитогенетических моделей. Для эффективного прогноза пространственного распределения почв мы должны знать определяющие его закономерности; в последние годы также отмечается, что следует учитывать вклад структурной организации на уровне, который не поддается анализу с точки зрения детерминистской логики из-за недостатка данных, а также псевдостochasticкую составляющую вариабельности почв [71]. Соответственно, современная география почв требует углубления понимания географических законов, определяющих пространственное строение почвенного покрова на разных уровнях организации, а также гармоничного соединения этого понимания с системой математических методов пространственного моделирования. В настоящей работе мы попытались оценить, насколько подоб-

ный синтез возможен в рамках традиционной почвенно-географической парадигмы, а также перспективы если не создания новой парадигмы, то хотя бы обновленной формулировки привычных представлений. Развитие статистического анализа пространственной неоднородности почв, геостатистики, других методов пространственного моделирования и цифровой почвенной картографии (ЦПК) до недавнего времени слабо увязывались с теоретическими основами географии почв. В то же время надо отметить, что ЦПК в значительной степени стимулировала интерес к почвенно-географическим исследованиям, поскольку нуждается в ясных количественных зависимостях между пространственным распределением факторов почвообразования и свойств почв [70].

Наши задачи выходили за рамки обсуждения интеграции математических методов в традиционную географию почв. В данной работе мы постарались несколько выйти за пределы обсуждения количественной революции [45] в географии почв. Анализ тех задач, которые в настоящее время назрели в этой области науки, привел нас к

мыслям о том, что серьезного осмысления требует не только методологический аппарат географии почв, но и интеграция в нее современных почвенно-генетических концепций, прежде всего, связанных с памятью почв и антропогенным воздействием на почвенный покров.

ПОДХОДЫ К ХАРАКТЕРИСТИКЕ ПОЧВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Распределение почв на поверхности Земли может быть объяснено в разных терминах. Рассматривая всю совокупность почвенно-географических исследований, можно отметить, что они весьма разнородны по масштабу, системам применяемых методов и даже по терминологии. Практические задачи, стоящие перед географией почв, также разнообразны: это картографирование в разных масштабах, почвенное районирование, экстраполяция и интерполяция данных. Перечисленные задачи с точки зрения эпистемологии подразумевают совершенно разные мыслительные операции, в частности, синтез, анализ, классификацию, генерализацию и пр. Понятно, что практически невозможно совместить все разнообразие почвенно-географических концепций, которые позволяют решать указанные задачи, в рамках только одного методологического подхода. Горячкин [9] подчеркивает значимость учения о структуре почвенного покрова Фридланда [44], отмечая, что в почвенно-географических исследованиях существуют и другие подходы [11]. Мы согласны, что описание структурной организации почвенного покрова — это важный, но не единственный подход в почвенной географии. По нашему мнению, условно можно выделить три различных подхода в географии почв, различающихся системой понятий, терминов и методов, применяемых к почвенному покрову [23]. На наш взгляд, эти три подхода могут быть названы статическим (или факторным, *steady factor approach* в англоязычной литературе), динамическим и структурным. Указанные подходы в географии почв не исключают друг друга, а вполне могут быть дополнительными. Статический подход берет начало с работ Докучаева [14]. Он базируется на пространственном приложении факторно-профильной парадигмы Докучаева; выражая основную идею данного подхода в несколько вульгарной форме, можно сказать, что почвы на земной поверхности различны, поскольку факторы почвообразования и их сочетания изменяются в пространстве. Наиболее ярко базовые положения факторного подхода выражены в биоклиматических законах: широтной и вертикальной зональности почв. Термин “статический подход” отнюдь не означает, что не учитываются динамические процессы почвообразования; по определению, любая почва — это динамическое природное тело. Статический характер

данного подхода состоит в том, что он подразумевает формирование почв в относительно стабильном поле факторов почвообразования и не привлекает идею о латеральных потоках вещества, дифференцирующих почвенный покров; другими словами, рассматриваются только вертикальные процессы в почвенном профиле [75].

Динамический подход направлен на объяснение процессов, ответственных за дифференциацию почвенного покрова: он подразумевает интерпретацию почвенного покрова в терминах почводифференцирующих процессов, то есть рассматривает латеральные потоки вещества в твердом и растворенном виде. В рамках данного подхода рассматриваются процессы происхождения, генезиса почвенных комбинаций. Динамический подход включает множество частных направлений и концепций, часть из которых будет рассмотрена ниже. В рамках динамического подхода, прежде всего, следует упомянуть “почвенную геоморфологию” (*soil geomorphology*), которая рассматривает роль в формировании почвенного покрова склоновых и эрозионных процессов. В более широком смысле почвенная геоморфология связывает распределение почв с рельефом, в частности, в рамках катенарного подхода. Почвенная геоморфология в широком понимании получила развитие как в отечественной, так и в западной школе [13, 30, 33, 47, 51, 54, 82], хотя сам термин используется преимущественно в англоязычной литературе. В российской школе латеральную дифференциацию почвенного покрова в результате перемещения вещества также активно обсуждали в рамках геохимии ландшафта [6, 31, 32].

Наконец, третий, структурный, подход рассматривает почвенный покров как совокупность объектов на земной поверхности, давая его качественные, полуколичественные и/или количественные характеристики, причем характеризует как параметры компонентов почвенного покрова (геометрию, размеры и др.), так и их взаимную связь. Хотя подобный подход в основном концентрируется на описании характеристик почвенного покрова, это не исключает последующую интерпретацию генезиса последнего, которая в отдельных случаях и представляет собой цель исследования. Структурная парадигма наиболее ярко проявляется в учении о структуре почвенного покрова Фридланда [43, 44, 53] и сходной концепцией почвенных ландшафтов Хоула и Кэмпбелла [59]. Более формальная характеристика организации почвенного покрова осуществляется с помощью педометрических методов, в частности, методов оценки почвенного разнообразия [1, 62, 63, 65, 72]. Это подход, отвлеченный не только от генезиса структуры почвенного покрова, но и от характеристик компонентов указанной структуры [21, 24]. Еще большая степень формализации характерна для геостатистических методов, которые рассматривают пространственное распреде-

ление отдельных количественных показателей почв [20, 36, 71, 73]. Как уже упоминалось, три подхода в географии почв являются не взаимно исключаемыми, а, скорее, взаимно дополняющими. Например, в разных масштабах один и тот же почвенный ландшафт может характеризоваться в терминах статического подхода в мелком масштабе и динамического — в крупном. В то же время следует отметить, что статический и динамический подходы не привязаны жестко к определенному масштабу. Например, почвенные мозаики в крупном масштабе вполне могут интерпретироваться в терминах литологической неоднородности, то есть с использованием статического подхода, а изменение почв на больших, вплоть до тысяч километров, расстояниях могут быть объяснены в рамках динамической концепции почвенно-геохимических арен по Глазовской [6]. Привлечение двух и более подходов к исследованию почвенного покрова в ряде случаев позволяет существенно продвинуться в понимании пространственной организации почв. Широко распространена ситуация, при которой структурная характеристика почвенного покрова в дальнейшем интерпретируется в терминах статического и динамического подходов. Собственно, на этом основывается учение о структуре почвенного покрова [43, 44]: почвенные комбинации классифицируются, среди прочих критериев, и по своему генезису.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПОЧВЕННО- ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Необходимость ревизии старых представлений проистекает не только из необходимости интеграции методов математического моделирования и ЦПК, но и из того факта, что многие представления, на которых явно или неявно опиралась почвенная география, к настоящему времени существенно трансформировались. Мы не ставим перед собой задачу дать в данной работе исторический обзор развития почвенно-географических исследований. Однако имеет смысл упомянуть некоторые достижения в области почвенной географии в последние десятилетия, которые могут лечь в основу нового этапа развития этой области науки.

Как отмечено выше, крупнейшим итогом развития почвенной географии во второй половине XX в. стало создание теории структуры почвенного покрова Фридланда [44, 53] и ее дальнейшее развитие в отечественной [7, 19], и зарубежной школах, где она приняла форму анализа “почвенных ландшафтов” [59, 61, 66]. В то же время сама классификация структур почвенного покрова оказалась довольно сложной и в целом малопонятной неспециалистам. Очевидно, поэтому за пределами русской почвенно-географической школы она редко используется, даже в “облегченном” варианте Хоула и Кэмпбелла [59].

Представляется интересным обратить внимание на те направления, которые развивались после В.М. Фридланда. В отечественной школе ряд интересных концепций высказал Соколов [38, 39], в частности, о существовании почвенных ареалов, а не явно выраженных широтных почвенных зон. Также им было творчески осмыслено катенарное распределение почв с гидрологических и геохимических позиций. Следует отметить, что внимание гидрологии и ее роли в формировании неоднородности почвенного покрова уделял Апарин [3], разработавший концепцию гидрологических полей почвообразования. Интересную типизацию структур почвенного покрова на севере России по динамике дренирования территории предложил Горячкин [10]. Специфику организации почвенного покрова в лесных экосистемах подробно охарактеризовал Карпачевский [16].

Начиная с работ Волобуева [4] многие исследователи пытались найти количественную зависимость распространения почв на земной поверхности от факторов почвообразования на глобальном уровне. Несколько упрощенный подход был использован Грэм с соавт. [56]; Алябиной [2] была развита предложенная Геннадиевым [5] концепция почвообразовательного потенциала географической среды, которая позволила производить прогнозное картографирование почвенных горизонтов и почв на основе данных о биоклиматических условиях и распространении почвообразующих пород.

Принципиально новый перспективный подход к характеристике организации почвенного покрова предложил Козловский [18], который ввел понятие “внутренней массы”, “поверхности раздела” и “информационной структуры почвенного покрова”. Как нам видится, этот подход содержит потенциал для емкой формализованной характеристики почвенного покрова в разных масштабах и остается сожалеть, что эти работы не получили продолжения. Желая расширить представление о теоретических подходах в современной географии почв рекомендуем ознакомиться с имеющимися обзорами [8, 9, 11].

Интересный подход к выявлению источников сложности почвенного ландшафта предложил Филлипс [77]. Подход основывается на методе “графов пространственного сопряжения почв”: сопоставляются формальные показатели графов пространственного сопряжения всех почв участка (спектральный радиус) с суммой аналогичных показателей эмпирически выделенных “факторных цепей” почв, например, топокатен, рядов по характеру материнской породы и др. Если сумма спектральных радиусов всех “факторных цепей” оказывается меньше спектрального радиуса участка, то почвенный покров не полностью объясняется известными факторами, и исследователь видит перспективы для дальнейшего исследования. Также теория графов может использоваться для решения как теоретических задач, таких как ана-

лиз причин сложности почвенного покрова [79], так и практических, например, для оценки возможных погрешностей почвенных карт [76].

Особое внимание следует уделить развитию методов формализации почвенно-географических данных и ее использованию для более глубокого понимания генезиса почвенного покрова. Прежде всего, следует упомянуть концепцию почвенного разнообразия, или педоразнообразия, которое является формальным показателем сложности почвенного покрова, основанным на коэффициентах разнообразия (Шеннона–Винера, Брюиллона, Симпсона, Жаккара и пр.) и графических моделях, по аналогии с биологическими объектами [21, 37]. Недостатком данного подхода является сильная зависимость от масштаба исследований и системы классификации почв [22]. В то же время почвенное разнообразие позволяет успешно анализировать пространственную неоднородность почв, ее причины и связь с биологическим разнообразием [65]. Как ранее показывалось некоторыми авторами [64, 80, 81], почвенное разнообразие тесно связано с геоморфологической эволюцией ландшафта, однако, по нашему мнению, эволюция речной сети представляет собой только частный случай развития почвенного покрова. Ранее мы предположили, что в целом с возрастом поверхности почвенное разнообразие возрастает до известного предела, а после достижения максимального значения медленно снижается [67]. Подробнее вопросы связи почвенной географии и концепции педоразнообразия рассмотрены в нашей статье [21].

Параллельно с развитием почвенной географии в последние десятилетия наблюдается бурный рост количественных методов анализа пространственной организации почв. В 1970-е и 1980-е гг. расширился, прежде всего, математический аппарат, используемый в количественном предсказании распределения почв и их свойств: применялись преимущественно статистические методы регрессионного и дискриминантного анализа [69, 74]. В 1990-е гг. широкое распространение получили геостатистические методы [35, 48, 73]. Геостатистический анализ и моделирование позволяют выявить внутренние закономерности пространственного распределения почвенных свойств [36]. Пространственное варьирование свойств почвы может быть определено как функция трех показателей: 1) диапазона значений, которые могут быть смоделированы по факторам почвообразования, 2) локального варьирования показателей, которое с трудом выводится из известных факторов и потому моделируется на основании полудисперсии, зависящей от расстояния между точками, и 3) стохастического (случайного), либо псевдостохастического варьирования, которое никак не моделируется и принимается за эмпирическую константу [55]. Казалось бы, подобный подход приводит нас к выводу о том, что пространственное распределение свойств почв невозможно

предсказать, однако парадоксальным образом отказ от жесткого детерминизма позволяет использовать вероятностный подход, который оказывается эффективным для решения некоторых практических задач. Например, анализ вариограмм, или вариография, позволяет выявить скрытую периодичность в распределении почвенных свойств, а в ряде случаев и степень развития и нарушенности почвенного покрова [20]. Анализ автокорреляции позволяет определить пространственную структуру почвенных показателей: например, значения коэффициента Морана показывают, насколько сгруппированы определенные значения в пространстве. Интерполяция почвенных данных позволяет создавать и более привычные для почвенного географа карты почвенных горизонтов [36] и собственно карты таксономических групп почв [46].

Дополнительным инструментом моделирования почвенного покрова стал аппарат нечеткой логики [52, 87–89]. Развитие математических методов пространственного моделирования привело к нескольким неожиданным результатам: некоторые исследователи пришли к выводу, что эти методы являются альтернативой традиционной почвенной географии. В научной литературе всерьез обсуждалась возможность того, что точные математические методы вытеснят недостоверное географическое знание (например, [15, 58]), что, по сути, представляло собой пропаганду позитивизма в его самом примитивном виде [23]. Однако со временем благодаря развитию ЦПК [40, 70] пришло понимание того, что математическое моделирование должно опираться, прежде всего, на экспертное знание. Рабочая группа по ЦПК Международного союза наук о почве дает следующее определение: “Цифровая почвенная картография – это создание и наполнение географически привязанных баз данных, генерируемых с определенным разрешением с использованием полевых и лабораторных наблюдений вкупе с данными об окружающей среде, связанными количественными отношениями”. В настоящее время бурное развитие методов обработки пространственно-распределенных данных, программного обеспечения ГИС и рост качества данных дистанционного зондирования позволило сделать качественный рывок в создании цифровых почвенных карт [29], в том числе при ограниченной эмпирической полевой информации [88]. В последние годы расширился масштаб применения ЦПК: в некоторых работах рассматривается моделирование уже в континентальном масштабе [57]. Методология ЦПК охотно адсорбирует классические подходы почвенной географии: так, концепция структуры почвенного покрова успешно интегрирована в ЦПК как в отечественной школе [40], так и за рубежом, где она отражалась в рамках понятия почвенного разнообразия [49]. В то же время надо ясно понимать, что ЦПК не заменяет географию почв, поскольку *метод не может заменить фундаменталь-*

ную дисциплину, однако устанавливает новую планку требований к почвенно-географическим моделям. В значительной степени требования ЦПК показали пробелы в широком круге вопросов почвенной географии; в частности, стала очевидна наша слабая способность учитывать палеопризнаки почв и их антропогенную трансформацию.

ПОЛИГЕНЕТИЧНЫЕ ПОЧВЫ В ПОЧВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как стало очевидным в последние десятилетия, подавляющее большинство почв с развитым профилем на нашей планете прошли более одного цикла почвообразования, которые оставили в них соответствующие записи [41, 82, 86]; с этим, в частности, связано разнообразие почвенных ландшафтов на Земле. Реконструкция прошлых почвообразовательных процессов представляет собой сложную задачу, особенно если требуется выявить пространственное распределение реликтовых свойств почв. Картографическое отражение теоретически обоснованных реликтовых признаков в мелком масштабе реализовал Ковда [17]. Отражение подобных свойств на более подробных картах может отчасти опираться на реконструкцию прошлого педогенеза, а отчасти — на методы пространственного анализа и моделирования, которые бурно развивались в последние десятилетия. Например, анализ пространственной вариативности физических свойств серых лесных почв позволил выявить палеокриогенные структуры, которые регулярно проявлялись в почвенном пространстве [12]. В дальнейшем пространственную структуру реликтовых почвенных признаков подробно исследовал Филлипс [78].

Само по себе включение указанных методов в общую структуру почвенно-географических знаний представляет собой новую задачу, поскольку ранее почвенно-географическая теория была источником экспертных знаний для пространственного моделирования, однако редко использовала пространственные модели для решения собственно почвенно-географических задач [20].

Важнейший шаг в развитии почвенно-географической концепции был сделан в работе Таргульяна и Соколова [42] о почве-моменте и почве-памяти, которая поставила вопрос о значительной роли унаследованных признаков в профилях современных наземных почв. Эта линия получила развитие в дальнейших работах отечественной школы [84]. Удачный опыт картографирования палеопочвенных признаков представлен Макеевым для перигляциальных областей Русской равнины [27].

Впечатляющих успехов добился в картографировании палеопочв и их включении в общую схему формирования почвенного покрова Италии Ко-стантини [50]. Поскольку почвенный покров Италии очень сложен, и в нем преобладают полигене-

тичные почвы и почвы на погребенных профилях, то диагностика подобных образований превращается в стране в первостепенную задачу, для решения которой с успехом применялись методы дистанционного зондирования и геофизической съемки.

ПОИСК ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЧВ

Хотя многочисленные работы показывают глобальный характер антропогенной трансформации почв, полноценный прогноз распределения почв на земной поверхности обычно ограничивается естественными почвами, отражающими природные факторы почвообразования. В то же время в отечественной почвенно-географической школе карты показывают реальные почвы, отражая их использование в сельском хозяйстве, либо в терминах освоенности и окультуренности, либо в виде “агрочувств”. Очевидно, что находящиеся под многолетним использованием в сельском хозяйстве или находящиеся на территории поселений почвы существенно отличаются от показанных на карте естественных аналогов. В то же время отображение антропогенной трансформации почв под многолетней (или многовековой) залежью возможно только на основании непосредственной полевой диагностики [26] или с помощью дополнительной информации, например, современных или исторических карт землепользования (см. [25]). Хотя выявление антропогенных изменений в почвах — непростая задача, существует ряд подходов и методов, позволяющих выявить территории, находившиеся под антропогенным воздействием в прошлом, на основании как дистанционных данных, так и маршрутных исследований (например, [28]). Более древние признаки трансформации также могут быть диагностированы [60]; также следует помнить, что следы обычной вспашки со временем стираются в почвенном профиле [26].

Нам видится, что включение антропогенного фактора в общий контекст почвенно-географических работ возможен только во взаимодействии с другими, в том числе с гуманитарными дисциплинами, прежде всего, историей и экономической географией. В частности, пространственное распространение процессов деградации почв связано не только с биоклиматическими и геоморфологическими факторами, но и с пространственным распространением промышленности и сельского хозяйства [68].

ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОГРАФИИ ПОЧВ И ВОЗМОЖНЫЕ ОТВЕТЫ НА НИХ

Задаваясь вопросом о том, какие вызовы стоят перед почвенной географией сегодня, важно ответить на принципиальный вопрос: насколько вообще почвенная география будет востребована

в ближайшем будущем для решения прикладных задач сельского хозяйства и смежных дисциплин? Не секрет, что развитие почвенной географии исходно возникло как ответ на необходимость инвентаризации земельных ресурсов для сельского хозяйства и в дальнейшем стимулировалось именно запросами практики [34]. Переход от пространственных моделей на основании почвенных таксонов к картографии отдельных почвенных свойств [71] в значительной степени был обоснован требованиями координатного земледелия, которое основано на учете данных в каждой точке с заданными координатами. Сегодня декларируется переход от координатного, “точного” земледелия к “умному” и “цифровому” земледелию, что подразумевает, что статическая характеристика почв уже не требуется: вместо одной сделанной карты в процессе обработки почвы или внесения удобрений каждый раз генерируется новая динамическая картограмма на основании “больших данных”, полученных из многочисленных датчиков [83]. Однако даже при получении данных о динамических свойствах почв в режиме реального времени, например, с помощью гиперспектральной спектроскопии [85] результаты ограничиваются поверхностью почвы, в то время как для расчета норм орошения и внесения удобрений требуется информация о почвенном профиле, которая получается только из почвенно-географических моделей. Это говорит о том, что знания о пространственном распространении почв и в будущем будут востребованы в сельском хозяйстве. Также очевидно, что почвенная география была и будет востребована не только в аграрном секторе, но и в других областях человеческой деятельности: экологии, исследованиях климатических изменений, палеогеографии и др. Немаловажно и то, что почвенная география самоценна как один из способов познания почвоведомы окружающего мира.

Как отмечалось выше, одним из вызовов современной географии почв является необходимость интеграции с математическими моделями пространственного распределения почвенных свойств. Для создания цифровых моделей почвенного покрова требуется знать количественные отношения между факторами почвообразования и косвенными характеристиками почв, с одной стороны, и свойствами почв, с другой стороны. Речь идет не только о переводе существующих знаний о почвенном покрове на язык математики, а о том, что уровень наших знаний пока недостаточен для количественного выражения многих эмпирических закономерностей. Ситуация усугубляется тем, что массовая почвенная съемка практически сошла на нет в большинстве стран мира и, скорее всего, ее возобновление не предвидится. Единственно возможное решение, на наш взгляд, связано с расширением использования как геофизической съемки, так и косвенной информации, получаемой из мно-

жественных источников с использованием технологии “big data”. Развитие этих технологий позволяет использовать большие объемы разнородной неупорядоченной информации для моделирования искомым характеристик почв. Источниками косвенных данных могут быть спутниковые данные, информация, полученная с дронов, в том числе с использованием гиперспектральной спектроскопии, метеорологические данные, получаемые в режиме реального времени, и многие другие источники, об использовании которых мы даже не задумывались.

С указанными выше задачами связана и растущая потребность в отражении и прогнозе разнообразных количественных почвенных показателей в базах данных и на картах. У почвенного географа есть возможности решить эти задачи множеством способов, среди которых, например, отход от карты, показывающей таксономические группы почв или их ассоциации как основы географического анализа; вместо них возможна разработка картограммы отдельных почвенных свойств и карт вероятностей отдельных почвенных горизонтов [36] и признаков, карт почвенных процессов, функций и связанных с почвой экосистемных услуг. Отдельной задачей будет сопоставление данных по таксономическому разнообразию почв и внутриконтурной вариативности отдельных почвенных свойств [35]; мы предполагаем, что подобное соотношение будет важной дополнительной характеристикой структуры почвенного покрова. Пространственная неоднородность почвенного покрова в большинстве случаев может и должна быть интерпретирована с почвенно-географических позиций.

Следующий вызов заключается в современной потребности не только в отражении статического состояния, но и в прогнозе динамики ландшафтов, в том числе при антропогенном воздействии, а также в оценке разнообразных рисков, например, деградации почв, неурожая, катастрофических процессов и др. Очевидным ответом может быть комбинированное использование динамических моделей и пространственных инструментов (ГИС).

Как отмечалось выше, полигенетичный характер большинства почв делает затруднительным установление линейной связи между современными факторами почвообразования и почвенным профилем. В то же время существует необходимость отражать реальные свойства почв, которые слабо связаны с современными природными факторами почвообразования, то есть могут рассцениваться как реликтовые. Ответом на это вызов может быть идентификация палеопочв и реликтовых признаков с использованием дистанционных данных и полевой геофизической съемки. В некоторых случаях регулярная съемка отдельных свойств почвы, в том числе с использованием геофизических или дистанционных методов, может помочь выявить структуры, связанные с пале-

криогенезом или иными процессами, протекавшими в прошлом.

Наконец, существует необходимость отражать реальные свойства почв, которые слабо связаны с современными природными факторами почвообразования, а полностью зависят от былой или современной антропогенной деятельности. В ряде случаев ответ лежит на поверхности, поскольку антропогенное воздействие очевидно по современному типу землепользования. В то же время былое использование земель не всегда очевидно. В этой ситуации могут помочь систематизация и привязка антропогенных воздействий к определенным географическим обстановкам. Хорошие результаты может дать привлечение исторических данных для характеристики землепользования в прошлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное развитие науки и потребности общества требуют от географии почв перехода на количественные модели зависимости от факторов почвообразования, активного использования методов косвенной диагностики почв, отражения в географическом пространстве отдельных свойств, процессов, функций, услуг почв в их динамике.

Современные карты должны учитывать реликтовые и антропогенные признаки, которые с трудом прогнозируются, но могут быть выявлены современными косвенными методами исследования почв.

Почвенно-географическое научное сообщество должно сформулировать теоретическую основу “новой географии почв” для осмысленного развития познания пространственной структуры педосферы. При этом переход к “новой географии почв” должен происходить эволюционным путем, через интеграцию существующей почвенно-географической парадигмы в изменяющийся мир. Новизна почвенно-географической науки будет заключаться не только в более широком использовании математических методов и переходе на количественную основу. Как нам видится, будущее географии почв также лежит в большей интеграции с сопредельными науками, такими как палеогеография, история, экономическая география, что поможет прийти к системному пониманию функционирования почвенного покрова.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-17-01293 “Многоуровневые региональные почвенно-географические модели как основа устойчивого управления почвенными ресурсами”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алябина И.О.* Картографическая оценка разнообразия почв России // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2018. № 1. С. 8–15.

2. *Алябина И.О., Неданчук И.М.* Оценка связи распространения почвенных горизонтов с климатическими параметрами // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1165–1176. doi 10.7868/S0032180X14080012

3. *Апарин Б.Ф.* Гидрологические поля почвообразования // Почвоведение. 1996. №. 5. С. 650–660.

4. *Волобуев В.Р.* Экология почв: очерки. Изд-во АН АЗССР, 1963. 260 с.

5. *Геннадиев А.Н.* Опыт исследования современного этапа почвообразования на северо-западе ЕТС // Почвоведение. 1985. № 6. С. 17–32.

6. *Глазовская М.А.* Почвы мира. География почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 328 с.

7. *Годельман Я.М.* Неоднородность почвенного покрова и использование земель. М.: Наука, 1981. 198 с.

8. *Горячкин С.В.* География почв: от реальности к моделям и прогнозам // IX Сократические чтения. Проблемы географической реальности. М.: Ин-т географии РАН, 2012. С. 125–142.

9. *Горячкин С.В.* Исследования структур почвенного покрова в современном почвоведении: подходы и тенденции развития // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1461–1468.

10. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.

11. *Горячкин С.В.* Проблема приоритетов в современных исследованиях почвенного покрова: структурно-функционально-информационный подход или парциальный анализ // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 53–80.

12. *Гумматов Н.Г., Жиромский С.В., Мироненко Е.В., Паченский Я.А., Щербаков Р.А.* Геостатистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 52–62.

13. *Джеррард А.Дж.* Почвы и формы рельефа: Комплексное геоморфологопочвенное исследование. Л.: Недра, 1984. 208 с.

14. *Докучаев В.В.* К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. СПб: Тип. СПб градоначальства, 1899. 28 с.

15. *Ибанес Х.Х., Салданья А.* Дилемма континуума в педометрии и почвоведении // Геостатистика и география почв. М.: Наука, 2007. С. 109–120.

16. *Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 313 с.

17. *Ковда В.А.* Основы учения о почвах. Часть 1. М.: Наука, 1973. 448 с.

18. *Козловский Ф.И., Горячкин С.В.* Почва как зеркало ландшафта и концепция информационной структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1996. № 3. С. 288–297.

19. *Козловский Ф.И.* Пути и перспективы дальнейшего развития концепции структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1992. № 4. С. 5–14.

20. *Красильников П.В.* Вариография дискретных почвенных свойств // Экология и география почв. Петрозаводск: Ин-т биологии КарНЦ РАН, 2009. С. 10–29.

21. *Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С.* Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 3–16. doi 10.7868/S0032180X17010014

22. *Красильников П.В., Лантратова И.М., Старр М.* Количественная оценка почвенного разнообразия Фенноскандии // Экологические функции почв

- Восточной Фенноскандии / Под ред. Т.С. Зверевой. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 108–123.
23. Красильников П.В. Предисловие // Экология и география почв. Петрозаводск: Ин-т биологии КарНЦ РАН, 2009. С. 4–9.
 24. Красильников П.В., Фуэнтес-Ромеро Э. Почвенное разнообразие: теория, практика и методы исследования // Материалы по исследованию русских почв. 2003. Вып. 4(31). С. 37–42.
 25. Кукушкина О.В., Алябина И.О., Голубинский А.А. Опыт реконструкции земельного использования почвенного покрова Балахнинского уезда Нижегородской губернии в XVIII–XIX веках (по картографическим источникам) // Почвоведение. 2018. № 7. С. 882–892. doi 10.1134/S0032180X18070067
 26. Люри Д.И., Горячкин С.В., Каравалева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
 27. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины. М.: ЗАО “Молнет”, 2012. 300 с.
 28. Методические рекомендации по выявлению массивов заброшенных пашен. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 52 с.
 29. Мешалкина Ю.Л. Что такое “Цифровая почвенная картография”? (обзор) // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 9–18.
 30. Неуструев С.С. Генезис и география почв. М.: Наука, 1977. 328 с.
 31. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
 32. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 763 с.
 33. Ромашкевич А.И. Горное почвообразование и геоморфологические процессы. М.: Ин-т географии АН СССР, 1988. 148 с.
 34. Савин И.Ю. Компьютерная инвентаризация почвенного покрова // Почвоведение. 1999. № 7. С. 899–904.
 35. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерновоподзолистых почв. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 160 с.
 36. Сидорова В.А., Красильников П.В. Использование геостатистических методов для картографирования почвенных горизонтов // Геоистатистика и география почв / отв. ред. П.В. Красильников. М.: Наука, 2007. С. 19–24.
 37. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования (обзор) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 4. С. 3–11.
 38. Соколов И.А., Конюшков Д.Е. О законах генезиса и географии почв // Почвоведение. 2002. № 7. С. 777–788.
 39. Соколов И.А. Теоретические проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: Наука, 1993. 232 с.
 40. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Возможности цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
 41. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв и реконструкция окружающей среды // Почвоведение. 2011. № 4. С. 507–508.
 42. Таргульян В.О., Соколов И.А. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент // Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1978. С. 17–33.
 43. Фридланд В.М. Об уровнях организации почвенного покрова в системе закономерностей географии почв // Вопросы географии. 1977. № 104. С. 139–154.
 44. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424 с.
 45. Харвей Д. Научное объяснение в географии. М.: Прогресс, 1974. 504 с.
 46. Хумров Н.Б. Создание детальных почвенных карт на основе интерполяции данных о свойствах почв // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1045–1045.
 47. Birkeland P.W. Soils and geomorphology. N.Y.: Oxford University Press, 1999. 372 p.
 48. Burgess T.M., Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semi-variogram and punctual kriging // J. Soil Sci. 1980. V. 31. P. 315–333.
 49. Costantini E.A.C., L’Abate G. Beyond the concept of dominant soil: Preserving pedodiversity in upscaling soil maps // Geoderma. 2016. V. 271. № 1. P. 243–253.
 50. Costantini E.A.C., Malucelli F., Brenna S., Rocca A. Using existing soil databases to consider paleosols in land planning: Case study of the Lombardy region (northern Italy) // Quaternary Int. 2007. V. 162–163. P. 166–171.
 51. Daniels R.B., Hamner R.D. Soil geomorphology. John Wiley & Sons, 1992. 239 p.
 52. Dobermann A., Oberthür T. Fuzzy mapping of soil fertility — a case study on irrigated riceland in the Philippines // Geoderma. 1997. V. 77. № 2–4. P. 317–339.
 53. Fridland V.M. Structure of the soil mantle // Geoderma. 1974. V. 12. № 1–2. P. 35–41.
 54. Gerrard A.J. Soil geomorphology. Springer Science & Business Media, 1992. 272 p.
 55. Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives // Geoderma. 1999. V. 89. P. 1–45.
 56. Gray J.M., Humphreys G.S., Deckers J.A. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database // Geoderma. 2009. V. 150. № 3–4. P. 309–323.
 57. Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues // Soil Sci. Soc. Am. J. 2011. V. 75. № 4. P. 1201–1213.
 58. Heuvelink G.B.M., Webster R. Modelling soil variation: past, present, and future // Geoderma. 2001. V. 100. № 2. P. 269–301.
 59. Hole F.D., Campbell J.B. Soil landscape analysis. Totowa: Rowman & Allanheld, 1985. 216 p.
 60. Holliday V.T. Soils in archaeological research. Oxford: Oxford University Press, 2004. 448 p.
 61. Huggett R.J. Soil landscape systems: a model of soil genesis // Geoderma. 1975. V. 13. P. 1–22.
 62. Ibáñez J.J., De-Alba S., Bermúdez F.F., García-Álvarez A. Pedodiversity: concepts and measures // Catena. 1995. V. 24. № 3. P. 215–232.
 63. Ibáñez J.J., De-Alba S., Lobo A., Zucarello V. Pedodiversity and global soil patterns at coarser scales (with Discussion) // Geoderma. 1998. V. 83. № 2. P. 171–214.
 64. Ibáñez J.J. Evolution of fluvial dissection landscapes in Mediterranean environments: quantitative estimates and geomorphic, pedologic, and phytocenotic repercussions // Zeitschrift für Geomorphologie. 1994. V. 38. № 1. P. 105–119.
 65. Ibáñez J.J., Krasilnikov P.V., Saldaña A. Archive and refugia of soil organisms: applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages // J. Appl. Ecology. 2012. V. 49. № 6. P. 1267–1277.
 66. Jamagne M., King D. The current French approach to a soilsclapes typology // Soil classification: A global desk

- reference. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003. P. 157–178.
67. *Krasilnikov P.V.* Distribución espacial de los suelos y los factores que la determinan // *Geografía de Suelos de México*. Tomo I. México, D.F.: UNAM, 2011. P. 1–41.
 68. *Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F.* Assessing soil degradation in northern Eurasia // *Geoderma Regional*. 2016. V. 7. № 1. P. 1–10.
 69. *McBratney A.B.* On variation, uncertainty and informatics in environmental soil management // *Australian J. Soil Res.* 1992. V. 30. № 6. P. 913–935.
 70. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. V. 117. № 1–2. P. 3–52.
 71. *McBratney A.B., Odeh I.O.A., Bishop T.F.A., Dunbar M.S., Shatar T.M.* An overview of pedometric techniques for use in soil survey // *Geoderma*. 2000. V. 97. P. 293–327.
 72. *Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E.* Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // *Geoderma*. 2010. V. 155. № 3–4. P. 132–139.
 73. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging // *Geoderma*. 1995. V. 67. № 3–4. P. 215–226.
 74. *Pavlik H.F., Hole F.D.* Soilscape analysis of slightly contrasting terrains in southeastern Wisconsin // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1977. V. 41. P. 407–413.
 75. *Pennock D.J., Veldkamp A.* Advances in landscape-scale soil research // *Geoderma*. 2006. V. 133. № 1–2. P. 1–5.
 76. *Phillips J.D.* Evaluating taxonomic adjacency as a source of soil map uncertainty // *European J. Soil Sci.* 2013. V. 64. № 4. P. 391–400.
 77. *Phillips J.D.* Identifying sources of soil landscape complexity with spatial adjacency graphs // *Geoderma*. 2016. V. 267. P. 58–64.
 78. *Phillips J.D., Marion D.A.* Pedological memory in forest soil development // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 188. № 1–3. P. 363–380.
 79. *Phillips J.D.* Soil complexity and pedogenesis // *Soil Science*. 2017. V. 182. № 4. P. 117–127.
 80. *Saldaña A., Ibáñez J.J.* Pedodiversity analysis at large scales: an example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain) // *Geomorphology*. 2004. V. 62. № 1. P. 123–138.
 81. *Saldana A., Ibáñez J.J., Zinck J.A.* Soilscape analysis at different scales using pattern indices in the Jarama-Henares interfluvium and Henares River valley, Central Spain // *Geomorphology*. 2011. V. 135. № 3–4. P. 284–294.
 82. *Schaetzl R.J., Anderson S.* Soils: Genesis and geomorphology. Cambridge N.Y.: Univ. Press, 2005. 817 p.
 83. *Shena S., Basist A., Howard A.* Structure of a digital agriculture system and agricultural risks due to climate changes // *Agriculture and Agricultural Science Proceedings*. 2010. V. 1. P. 42–51.
 84. *Targulian V.O., Goryachkin S.V.* Soil memory: types of record, carriers, hierarchy and diversity // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2004. V. 21. № 1. P. 1–8.
 85. *Viscarra Rossel R.A., Taylor H.J., McBratney A.B.* Multivariate calibration of hyperspectral γ -ray energy spectra for proximal soil sensing // *European J. Soil Sci.* 2007. V. 58. № 1. P. 343–353.
 86. *Yaalon D.H.* Soil-forming processes in time and space // *Paleopedology—origin, nature and dating of paleosols*. Jerusalem: Int. Soc. Soil Sci. and Israel Univ. Press, 1971. P. 29–39.
 87. *Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D.* Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2001. V. 65. № 5. P. 1463–1472.
 88. *Zhu A.X., Yang L., Li B., Qin C., English E., Burt J.E., Zhou C.* Purposeful sampling for digital soil mapping for areas with limited data // *Digital soil mapping with limited data*. Springer, Dordrecht, 2008. P. 233–245.
 89. *Zhu A.X., Yang L., Li B., Qin C., Pei T., Liu B.* Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic // *Geoderma*. 2010. V. 155. № 3–4. P. 164–174.

Towards “New Soil Geography”: Challenges and Solutions: A Review

P. V. Krasilnikov^{a, b, *} and V. O. Targulian^c

^a *Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

^b *Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS, Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

^c *Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetni per. 29, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: krasilnikov@ecfs.msu.ru

The paper provides a review of the current state of soil geography and budding directions for the development of pedogeographic research. We mention some new ideas in the frames of structural approach rooting in the classical concept of soil cover pattern and based on new concepts, such as pedodiversity assessment, graph theory, and geostatistical analysis of soil spatial variation. We note the significance of digital soil mapping in the development of the theory and practice of pedogeography and stress that digital soil mapping is a method that cannot replace soil geography as a scientific discipline. There is a need for deeper integration of mathematical methods in traditional soil geography. We stress that pedogeographical models are required for predicting soil properties and regimes even in digital agriculture. We discuss the necessity for adequate reflection of polygenetic soils in the soil mantle, and recommend using both indirect paleogeographic information and current remote and proximate sensing data. We also note the difficulties in predicting the spatial distribution of anthropogenically transformed soils using state factor theory; we discuss the possibilities of broader use of historical and economical geography data. In conclusion, we suggest developing “new soil geography” not only through integration of mathematical methods but also through closer integration with allied sciences.

Keywords: soil pattern structure, pedometrics, polygenetic soils, anthropogenically transformed soils, digital agriculture