

**АКАДЕМИЯ НАУК СССР · СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ И АГРОХИМИИ**

**ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR
SIBERIAN BRANCH
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND AGROCHEMISTRY**

A. A. R O D E

SYSTEM OF RESEARCH METHODS IN SOIL SCIENCE

Editor-in-chief
R. V. KOVALYOV, D. Agr. Sc. Prof.

**PUBLISHING HOUSE «NAUKA» SIBERIAN BRANCH
NOVOSIBIRSK • 1971**

А. А. РОДЕ

СИСТЕМА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОЧВОВЕДЕНИИ

Ответственный редактор
д-р с-х наук проф. Р.В. КОВАЛЕВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» • СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НОВОСИБИРСК • 1971

ОГЛАВЛЕНИЕ

CONTENTS

Введение	7	Introduction	7
Почва и почвообразователь- ные процессы	7	Soil and soil-forming process	7
Сравнительно-географический метод исследования почв	19	Comparative — geographical met- hod in soil research	19
Изучение состава и свойств твердой фазы почв	26	Study of composition and pro- perties of soil solid phase	26
Изучение почвообразователь- ных макропроцессов	42	Study of soil-forming macrop- rocesses	42
Моделирование почвообра- зовательных процессов	65	Soil-forming processes model- ling	65
Заключение	74	Conclusion	74
Резюме	80	Summary	84
Литература	88	References	88

В работе рассматривается понятие о почвообразовательном процессе и различных его аспектах (микропроцессы, частные и общие макропроцессы). Критически излагаются основные методы почвоведения: сравнительно-географический, сравнительно-аналитический, стационарный и метод моделирования. Указываются рамки применения этих методов к изучению почвообразования в отдельности и в виде системы методов. Формулируется основная задача теоретического почвоведения как познание сущности процесса почвообразования. Вводится понятие о живой фазе почвы. Указывается на недостаточную разработку вопросов почвенной микробиохимии, лежащей в основе познания почвообразовательного процесса.

Книга рассчитана на научных работников и студентов-почвоведов, агрономов, географов, биогеоценологов.

The conception on soil-forming process and its different aspects (microprocesses, particular and general macroprocesses) is considered in the work. Principal methods of soil science are stated critically. comparative-geographical, comparative-analytical, stationary and method of modelling. Application ranges of these methods for the study of soil-formation are indicated both separately and as system of methods. The main task of theoretical soil science as the cognition of the essence of soil-formation is formulated. New conception on soil living phase is introduced. Insufficient elaboration of problems of soil microbiobiochemistry is indicated, which is the basis of the cognition of soil-forming process.

The present book is destined for scientific workers and students-soil scientists, agronomists, geographers, biogeocoenologists.

Почва представляет собой трехфазную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Познать почву — означает познать эти три фазы в отдельности и в их совокупном взаимоотношении, изучив статику и динамику этой системы.

К. К. Гедройц, 1926

...исследование «жизни» почвы только начинается, но уже полученные результаты заставляют высказать пожелание, чтобы скорее было приступлено к систематическому изучению динамики главных почв по почвенным зонам и областям, притом по генетическим горизонтам почв.

С. А. Захаров, 1927

Биокосные естественные тела — характерны для биосферы. Это закономерные структуры, состоящие из косных и живых тел одновременно (например, почвы), причем все их физикохимические свойства требуют — иногда чрезвычайно больших — поправок, если при их исследовании не учтено проявление находящегося в них живого вещества.

Всякая почва есть характерное биокосное тело. Это ясно видел уже В. В. Докучаев... Процесс выветривания горных пород есть биокосный процесс, что обычно не учитывается,

В. И. Вернадский, 1939

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о методах исследования в почвоведении не нов — он возник вместе с зарождением самой науки — естественно-научного, докучаевского почвоведения. На протяжении всей истории развития нашей науки ее методическое вооружение усложнялось, обогащалось и усиливалось. В результате этого появилось несколько групп методов и в настоящее время представляется целесообразным попытаться подвести некоторые итоги в этом направлении и уточнить — какими же именно методами располагает почвоведение, в каком соотношении они находятся друг с другом и что они могут дать.

Выбор метода исследования всегда тесно связан с целью последнего. Но в настоящей работе мы ставим себе задачей рассмотреть вопрос о методах в почвоведении в наиболее широком и общем аспекте, т. е. исходя из задач теоретического почвоведения. Мы исходим при этом из предположения, что именно такая постановка вопроса обеспечивает возможность приложения конкретных методов и к любой частной задаче.

ПОЧВА И ПОЧВООБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Предмет исследования в почвоведении — почвы: их состав, свойства, образование (генезис), современная «жизнь» (т. е. происходящие в них в настоящее время процессы) и их географическое распространение.

Основной тезис докучаевского почвоведения — положение о том, что почвы суть самостоятельные природные тела. В составе почв принято выделять три «фазы» — твердую (включая мертвые растительные и животные остатки, гумус и другие

органические вещества), жидкую (почвенный раствор) и газообразную (почвенный воздух). Отметим, что термин «фаза» в данном случае не вполне корректен. Он применяется не в том строгом смысле, как в физической химии. Говоря о «фазах» почвы, имеются в виду, собственно говоря, составные части почвы, находящиеся в различном физическом состоянии. Но поскольку термин «фаза» в этом последнем смысле слова в почвоведении «прижился», — отказываться от него не будем, будем пользоваться им как синонимом «составной части», не прибегая к кавычкам.

Кроме упомянутых трех фаз, биологически-мертвых, в почве существует еще одна, четвертая, фаза — фаза живая.

Живой фазой будем называть совокупность всех живущих в почве живых организмов-микроорганизмов (бактерии, грибы, актиномицеты, водоросли и т. д.), а также мелких беспозвоночных животных (простейшие, черви, насекомые и их личинки, паукообразные, многоножки, моллюски и т. д.) Все данные организмы должны рассматриваться как составная часть почвы. Это соответствует представлению о почве как о «минерально-органической системе» (В. В. Докучаев) или «биокосном теле» (Вернадский, 1939), причем «живая фаза» есть живое вещество, входящее в состав этого тела.

Живая фаза, конечно, существенно отличается от первых трех фаз. Каждый из входящих в состав четвертой фазы живых индивидуумов сам представляет собой сложную систему, в состав которой входят и твердые вещества (например, раковинки моллюсков или хитиновые покровы насекомых), и жидкие, причем последние представлены по преимуществу веществами коллоидной природы, образующими внутреннее содержание живых клеток.

Газообразная фаза также представлена в живых организмах в их дыхательных и иных органах, причем ее живой состав естественно отличается от состава окружающего почвенного воздуха.

При выделении особой живой фазы в составе почвы возникают два вопроса — во-первых, следует ли относить к этой фазе позвоночных животных, постоянно обитающих в почве (мышевидные грызуны, кроты, суслики и др.) и во-вторых, следует ли относить к ней корни высших растений?

На первый из этих вопросов следует дать, безусловно, положительный ответ. Все эти роющие позвоночные животные механически перемещают в процессе жизнедеятельности значительные массы почв на глубину, нередко превышающую 1 м. Перемещение почвенных масс из одних горизонтов почвы в другие не может не влиять на ход почвообразовательного про-

цесса. Особенно ярко такое влияние выражается тогда, когда в верхние горизонты почвы, бескарбонатные и бессолевы, поступает почвенная масса из нижних карбонатных и засоленных горизонтов. Деятельность животных в данном случае противодействует процессу рассоления почвы. Подобные явления изучались давно. За последние годы они были обстоятельно освещены в работах Б. Д. Абатурова, В. А. Девярых и Д. В. Зубковой (1969), К. С. Ходашевой и Л. Г. Динесмана (1961) и др. Однако деятельность тех же животных во многих случаях может иметь и обратный эффект. По ходам нор этих животных устремляются весной талые воды, вызывая глубокое промачивание и выщелачивание солей. Таким образом, в целом деятельность животных вызывает сложную совокупность явлений перераспределения основной массы почвы и воднорастворимых соединений. Поэтому роющих грызунов и других позвоночных животных, постоянно живущих в почве, безусловно, следует включить в состав живой фазы почвы, как бы это ни показалось странным с первого взгляда в силу их относительно «неравномерного содержания» в почве. Впрочем, кажущаяся неравномерность содержания в значительной мере уменьшается, если учесть, что эти животные охватывают норами большие площади и большие объемы почвы, по которым, собственно говоря, и следует судить с «концентрации» в почве этих организмов.

Корни же высших растений не следует относить к живой фазе. Корни — органы высших растений, т. е. биологических индивидуумов, обитающих частично в почве, частично в нижних слоях атмосферы. При этом именно атмосфера есть та среда, которая обеспечивает возможность осуществления растениями их самой важной и самой характерной функции — фотосинтеза. Поскольку эти растения в целом не являются составной частью почвы, постольку не могут быть частью почвы и их отдельные органы — корни, хотя они и находятся в почвенном слое.

Отличительные черты почвы как четырехфазной системы — по большей части высокая дисперсность, а следовательно, и высокая удельная поверхность твердой и живой фаз. Эти черты обуславливают тесное взаимопроникновение, а следовательно, и активное взаимодействие всех четырех фаз.

Между почвой и другими природными телами (атмосфера, грунт и наземные живые организмы — растительные и животные) происходит взаимный обмен различными веществами и энергией. Он совершается в гравитационном поле Земли, создающем тенденцию к преимущественно нисходящему передвижению веществ. В этом обмене участвует также лучистая

энергия Солнца, которая, поступая на поверхность почвы, превращается в другие формы энергии. Часть ее, превращаясь в тепловую, расходуется на нагревание почвы и на испарение почвенной влаги как физическое, непосредственно из почвы, так и транспирационное. В последнем случае испарение происходит с поверхности листьев растений и вызывает десукцию влаги из различных частей почвенной толщи. В обоих случаях иссушение почвы влечет за собой увеличение ее сорбционной (поверхностной) энергии.

Таким образом здесь происходит трансформация радиационной энергии сначала в тепловую, а затем в поверхностную. Так как степень иссушения, как правило, уменьшается сверху вниз, в почве создается, направленный вниз градиент всасывающего давления, противоположный по направлению градиенту силы тяжести и обуславливающий восходящее передвижение почвенного раствора.

Следовательно, лучистая энергия Солнца тормозит элювиальные процессы. В зависимости от физико-географических условий, главным образом от количества атмосферных осадков и влияния на их перераспределение рельефа, в результате этой антиэлювиальной роли лучистой энергии могут возникнуть различные типы водного режима почв, а следовательно и различное строение, в первую очередь, солевых (в широком смысле этого слова) профилей почв.

Если величина испаряемости (зависит от величины радиационного баланса) меньше количества влаги, поступающего в почву, то создается водный режим промывного типа. С увеличением испаряемости и уменьшением количества осадков сквозное промачивание делается сначала не ежегодным, и создается водный режим периодически промывного типа. При дальнейшем изменении климатических условий в том же направлении сквозное промачивание почвенно-грунтовой толщи прекращается полностью и устанавливается непромывной водный режим. Вследствие этого в почвенно-грунтовой толще возникает восходящее движение влаги от зеркала грунтовых вод (если этому не препятствуют литологические особенности строения грунта). Указанный восходящий поток влаги служит причиной накопления солей на нижней границе почвенного профиля. Мощность последнего в этом случае определяется максимальной глубиной сезонного промачивания почвы, с которой обычно совпадает и максимальная глубина проникновения корней. На этой стадии имеется, собственно говоря, сочетание двух противоположных процессов: ограниченного элювиального в почвенной толще и ограниченного соле-аккумулятивного в толще грунта.

При изменении (в пространстве или во времени) климатических условий в сторону дальнейшего увеличения испаряемости и уменьшения количества влаги, поступающей в почву, глубина промачивания, а следовательно, и мощность элювиальной толщи, уменьшается, и горизонт аккумуляции солей приближается к поверхности почвы. В крайнем случае элювиальный процесс вообще затухает и начинается прогрессивное накопление солевой корки на дневной поверхности. Почвообразование на этой последней стадии засоления по сути исчезает, и процесс приобретает физико-геологический характер.

Рассмотренный только что антиэлювиальный эффект радиационной энергии осуществляется полностью в самой почве. Другое проявление того же эффекта — поток минеральных («зольных») веществ и азота, осуществляемый высшими растениями. Он заключается, как известно, в том, что высшие растения извлекают корнями различные минеральные вещества и соединения азота из разных горизонтов почвы, с разных глубин. Вещества, поступившие из почвы в корни, в дальнейшем перемещаются в надземные органы растений. Это передвижение происходит в составе растворов, восходящая миграция которых связана с транспирацией растений, а следовательно, тоже с участием радиационной энергии. Надземные органы растений, отмирая, поступают на поверхность почвы и в самые поверхностные ее слои, где и заканчивается таким образом биологический погон зольных веществ и соединений азота, начинающийся в более или менее глубоких слоях почвы. Следовательно, и этот поток имеет восходящее (антиэлювиальное) направление и происходит при участии радиационной энергии. Химический же состав этого потока в значительной мере зависит от избирательной способности, т. е. от биологических особенностей растений, образующих растительный покров. Однако он всегда бывает обогащен основаниями.

Из сказанного вытекает, что ведущее положение биологического фактора в почвообразовании определяется тем, что высшие растения через свой опад делают возможным вовлечение в процесс почвообразования радиационной энергии Солнца, трансформируя ее в процессе фотосинтеза в энергию химическую. Одновременно высшие растения, тоже через свой опад, вызывают при участии радиационной энергии, трансформированной в тепловую, сорбционную и капиллярную, восходящее движение минеральных веществ и соединений азота из глубоких слоев почвы на ее поверхность, определяя при этом и состав этого потока. Само же включение трансформированной радиационной энергии в процесс почвообразования обеспечивается другой группой живых организмов, составляющих

живую фазу почвы и осуществляющих разложение растительного опада.

Живая фаза почвы в процессе разложения остатков высших растений и превращения продуктов этого распада создает ряд органических кислот, которые, по-видимому, играют существенную роль при разрушении (выветривании) как первичных, так и вторичных минералов и в мобилизации продуктов этого разрушения. В результате деятельности живой фазы образуются и такие важные в круговороте азота вещества, как ионы аммония, азотистой и азотной кислот, восстановление соединений железа и марганца, фиксация молекулярного азота, освобождение зольных элементов, пахавшихся в составе остатков высших растений, и перевод их в формы, доступные для этих последних, образование микоризы и т. д.

Вместе с тем жизнедеятельность живой фазы, в сочетании с некоторыми физико-химическими реакциями, создает гумус — более или менее длительно-устойчивую органическую составную часть почвы, в которой аккумулируется радиационная энергия, трансформированная в энергию химическую.

Обмен веществом и энергией между почвой, с одной стороны, и другими природными телами (грунт, атмосфера и живое вещество) — с другой, поступление радиационной энергии, жизнедеятельность живой фазы почвы и влияние гравитационного поля Земли — вот важнейшие причины превращения и передвижения веществ и энергии в почве, т. е. все они являются причиной возникновения разнообразных по своей природе, своему характеру, и своему содержанию и сущности взаимосвязанных почвенных процессов. Всю совокупность последних в общем ходе становления, исторического развития и современного существования («жизни») почвы мы называем почвообразовательным процессом, или **генезисом почвы**, а продукт их — почвой.

Познание внутреннего существа («механизма») этого процесса и есть главная научная задача генетического почвоведения.

Поэтому исследование почвы природного тела должно заключаться в изучении ее свойств и состава, процесса ее образования (становления и развития) и ее современной «жизни», т. е. постоянно совершающихся в ней различных простейших физических, химических и биологических (в самом широком смысле этих терминов) явлений и процессов в их совокупном взаимодействии, а также в установлении географического распределения почв на Земле и его закономерностей.

Указанные простейшие процессы по их характеру могут быть подразделены на три группы: а) процессы обмена веществами и энергией между почвой и другими природными телами (процессы поступления в почву и выноса из нее), б) процессы превращения веществ и энергии, происходящие в самом почвенном теле и в) процессы передвижения веществ и энергии в почвенном теле.

К первой из этих групп относятся следующие процессы: 1) многосторонний обмен газами в системе атмосфера — почва — растение (корни) — грунт; 2) такой же многосторонний, в той же системе, обмен влагой (жидкой и парообразной); 3) обмен коротко- и длинноволновой радиацией в системе солнце — почва — атмосфера — космическое пространство; 4) многосторонний обмен тепловой энергией в системе атмосфера — почва — грунт; 5) двусторонний обмен зольными веществами и азотом в системе почва — высшая растительность; 6) безобменное одностороннее поступление в почву органического вещества, синтезированного высшими растениями, несущего в себе химическую энергию, являющуюся трансформированной лучистой энергией Солнца.

Ко второй группе относятся такие явления, как: 1) бесчисленные, разнообразные реакции разложения органических соединений, входящих в состав растительного опада; 2) столь же многообразные явления микробного синтеза и микробного разложения, образования и разложения органо-минеральных соединений разной природы (комплексные золи и гели, хелаты, органические соли металлических катионов и т. д.); 3) явления новообразования и распада различных органических кислот и их солей; 4) аммонификация, нитрификация и денитрификация; 5) явления окисления и восстановления, в особенности соединений железа и марганца; 6) отдельные реакции, из которых слагаются явления разложения и превращения первичных и вторичных минералов и синтеза вторичных; 7) замерзание и оттаивание почвенной влаги; 8) явления ее внутрипочвенных испарения и конденсации и др.

И третья группа: 1) передвижение воздуха внутри почвы под влиянием изменений атмосферного давления и температуры; 2) диффузное передвижение газов в почвенном воздухе; 3) передвижение жидкой влаги под влиянием силы тяжести, капиллярных, сорбционных и осмотических сил; 4) передвижение водяного пара под влиянием градиента его давления, обусловленного температурным градиентом или градиентом сорбционных сил (при влажности ниже ВЗ); 5) передвижение почвенной массы животными-землероями и криотурбационными явлениями.

Все эти явления и процессы целесообразно было бы называть элементарными почвообразовательными процессами. Но этот термин И. П. Герасимовым и М. А. Глазовской (1960) был использован для наименования процессов другого порядка, более сложных, о которых пойдет речь дальше. Поэтому, во избежание путаницы, мы предлагаем названным простейшим явлениям, реакциям и процессам дать условное название почвообразовательных микропроцессов.

Характерная черта почвообразования — его цикличность. Она подчинена, с одной стороны, существующему в природе тройному (суточному, годичному и многолетнему) ритму в поступлении на поверхность почвы радиационной энергии, связанному с вращением Земли около своей оси, с ее обращением вокруг Солнца, с многолетними колебаниями активности Солнца, а с другой стороны, — биологическому ритму развития растений.

Цикличность почвообразования выражается в возникновении и взаимной смене слагающих его микропроцессов противоположного характера и направления. Примерами такой смены являются: нагревание — охлаждение почвы, ее увлажнение и иссушение, реакции разложения органических веществ и их синтеза, нитрификация и денитрификация, окисление и восстановление различных соединений, реакции, обуславливающие распад вторичных минералов и их новособразование и т. д. Вместе с тем, однако, в почве существуют процессы, идущие постоянно в одном направлении, хотя и с переменной скоростью. Таков, например, распад первичных минералов.

Цикличность почвообразования характеризуется тем, что циклы разной продолжительности и разной степени выраженности налагаются друг на друга. В большинстве случаев наиболее резко выражен годичный цикл, так как именно ему свойственна наибольшая амплитуда изменений условий (в особенности радиационных и тепловых) при чередовании сезонов года.

Однако на земном шаре встречаются и такие сочетания географических (преимущественно климатических) условий, при которых суточная амплитуда радиационных и тепловых условий значительно превышает годовую.

Вследствие смены явлений одного направления и характера явлениями противоположного направления и характера возникает тенденция обратимости почвообразовательных микропроцессов.

Однако полной обратимости, т. е. полного замыкания цикла, полной компенсации одного полуцикла другим, с об-

ратным направлением, как правило, не возникает. По окончании цикла всегда сохраняются некоторые остаточные изменения. Накапливаясь в ряду следующих друг за другом циклов, эти остаточные изменения сливаются в прогрессивный необратимый процесс, воспринимаемый нами как почвообразовательный макропроцесс, в результате которого появляется зарождение, становление и развитие почвы того или иного типа.

Как видим, это развитие есть в значительной мере результат взаимной смены («борьбы») противоположно-направленных микропроцессов.

Изменения, накапливающиеся в разных слоях формирующейся почвенной толщи, по своей качественной сущности различны. В силу этого указанная толща расчленяется на несколько горизонтов, отличающихся друг от друга различными признаками, но взаимно связанных в своем происхождении. Эта связь выражается главным образом через передвижение различных веществ из одних горизонтов в другие, частично сопровождающееся аккумуляцией. Признаки, по которым возникающие горизонты отличаются друг от друга, устойчивы и существенно не меняются на протяжении годовых и многолетних циклов, но способны к эволюции в вековых циклах (с чем связана эволюция почвы в целом). Поскольку каждому горизонту присуща особая система признаков, постольку можно выделять частные почвообразовательные макропроцессы (элементарные почвенные процессы по И. П. Герасимову и М. А. Глазовской), сложные и комплексные по своей природе, слагающиеся из многих микропроцессов.

Перечислим важнейшие частные почвообразовательные макропроцессы: 1) образование поверхностных органогенных горизонтов (степной войлок, лесная подстилка, торф), сопровождаемое аккумуляцией в них зольных элементов и азота; 2) гумусово-аккумулятивный процесс, т. е. образование минерально-гумусовых горизонтов, также сопровождаемое аккумуляцией в них зольных элементов; 3) засоление (карбонатное, гипсовое, легкорастворимыми солями); 4) ожелезнение и оруденение; 5) рассоление (от карбонатов, гипса, легкорастворимых солей); 6) лессиваж; 7) осолодение; 8) оподзоливание; 9) оглинивание (образование глины *in situ*, т. е. сипаллитизация, обычно сопровождающаяся десиликацией); 10) ферралитизация (тоже сопровождается десиликацией); 11) иллювиальные процессы (иллювиально-железистый, иллювиально-гумусово-железистый, иллювиальный глиноземно-гумусовый, иллювиально-глинный, иллювиально-карбонатный); 12) оглеение; 13) осолонцевание.

Весьма вероятно, что этот перечень частных почвообразовательных макропроцессов и не полон, в особенности в части, относящейся к тропическим почвам, с которыми автор лично не знаком.

Все указанные частные почвообразовательные макропроцессы, представляющие по своей сущности совокупность явлений превращения и передвижения веществ и энергии, могут налагаться друг на друга по несколько в одном и том же горизонте. Например, при образовании гумусового горизонта подзолистой почвы налагаются друг на друга процессы: гумусово-аккумулятивный и оподзоливания; при образовании гумусового горизонта поверхностно-глеувато-подзолистой почвы к этим двум частным макропроцессам присоединяется еще третий — оглеение и т. д.

В результате частных почвообразовательных макропроцессов или, чаще, их сочетаний зарождаются различные почвенные горизонты. Система взаимосвязанных в своем происхождении через миграцию и аккумуляцию веществ горизонтов образует почвенное тело с присущим ему характерным профилем.

Таким образом, почва является продуктом сложного процесса, слагающегося из множества различных взаимосвязанных простейших микропроцессов, объединяющихся в частные почвообразовательные макропроцессы.

Этот сложный процесс будем называть общим почвообразовательным макропроцессом.

Именно такие процессы имеются в виду, когда говорим о процессах: подзолистом, черноземном, буроземном, солонцовом и т. д. Продуктом общего почвообразовательного макропроцесса всегда будет почвенное тело с характерным, присущим ему, сочетанием горизонтов.

Формулируя представления о почвообразовательных процессах различных уровней, отметим, что современные почвообразовательные макропроцессы можно было бы назвать просто почвенными процессами, подчеркнув этим то обстоятельство, что они протекают в уже сформированной почве. Однако именно микропроцессы лежат и в основе всего почвообразования в целом с момента его зарождения, в силу чего их все же правильнее называть почвообразовательными микропроцессами.

В образовании почв различных типов могут принимать участие одинаковые группы микропроцессов. В этом, а также в ведущем значении в почвообразовании биологического фактора заключается **единство** современного почвообразовательного процесса.

Причинами различий между образующимися почвами могут быть, во-первых, различия в составе материнских горных пород и в составе растительности (два главных первоисточника веществ, из которых образуется почва), во-вторых, указанная разница обуславливается тем, что в зависимости от других факторов почвообразования — рельефа и главным образом климата, — микропроцессы, участвующие в формировании почвенного профиля и отдельных его элементов, протекают с разной скоростью и с разной продолжительностью, причем и скорость и продолжительность их могут изменяться в ходе развития почвы. Третья причина различий — возраст почвы.

Первоначально однородная толща породы расчленяется на почвенные генетические горизонты, потому что в различных слоях толщи, по указанным только что причинам, создаются свои особые сочетания микропроцессов с той или иной их интенсивностью. Это отражается в преобладании одних микропроцессов над другими, в результате чего и возникает тот или иной частный макропроцесс. Такое преобладание нередко имеет своей природой миграцию различных веществ из одного горизонта в другой. Указанные сочетания микропроцессов в ходе образования и развития почвы могут изменяться. При этом от первоначальных сочетаний в почвенном профиле должны оставаться реликтовые признаки. Однако сохранность последних весьма различна и часто очень недостаточна, поэтому их в профиле можно и не обнаружить. Это обстоятельство весьма затрудняет восстановление истории почв по их профилям.

Методы исследования почвообразовательных макропроцессов частных и общих — с одной стороны, и почвообразовательных микропроцессов, с другой — различны. Поэтому полное и всестороннее изучение почвы и происходящих в ней процессов требует приложения системы различных методов.

Прежде чем приступить к рассмотрению этой системы, остановимся еще на некоторых общих вопросах.

К основным источникам информации при изучении почв и почвообразовательных процессов относятся следующие:

1. Изучение вещественного состава и материальных свойств почвенных тел.
2. Изучение закономерностей распределения почв на поверхности земного шара, сопряженное с факторами и условиями почвообразования.
3. Непосредственное изучение почвообразовательных микропроцессов и их сочетаний — почвенных режимов, — включая явления обмена веществами и энергией между почвой и

другими природными телами и поступление, превращения и отдачу радиационной энергии.

4. Моделирование почвообразовательных процессов (в особенности микропроцессов и частных почвообразовательных макропроцессов) в лабораторных и полевых опытах.

Независимо от того, каким из этих четырех источников информации мы пользуемся в том или ином конкретном случае, при исследовании почв и почвообразовательных процессов должны соблюдаться следующие общие основные принципы исследования.

Почва анизотропна, причем главная причина ее анизотропности заключается в самом процессе образования почвы, расчленении ее толщи на отличающиеся друг от друга по составу и свойствам горизонты. Такая почвенно-генетическая, так сказать, анизотропность нередко осложняется еще первоначальной геологической неоднородностью (слоистостью) материнской породы. Благодаря анизотропности почвы, объектом исследования всегда должен быть ее профиль или, иначе говоря, система взаимно связанных в своем происхождении горизонтов, слагающих собою почвенное тело. Поэтому первый, самый важный и хорошо известный принцип исследования почв — профильное их изучение. А так как сами почвенные горизонты могут быть тоже анизотропны, то второй принцип исследования — непрерывность в исследовании профиля почвы. Несоблюдение этого принципа может повлечь за собой выпадение из результатов исследования каких-либо морфологически не выраженных, но тем не менее важных особенностей строения профиля почвы, или отдельных его горизонтов. Кроме того, непрерывность в изучении профиля почвы позволяет объективно обосновать существование границ между почвенными горизонтами — особенно в тех случаях, когда эти границы морфологически выражены нерезко.

Во избежание возможности неправильного толкования принципа непрерывности в исследовании профиля, поясним, что ему отнюдь не противоречит возможность и необходимость отдельного изучения в любом горизонте или его части тех или иных особых образований: конкреций, примазок, пленок и т. д.

Третий общий принцип изучения почв и почвообразовательных процессов, обосновывать который, ввиду его самоочевидности, едва ли следует, заключается в необходимости одновременного сопряженного изучения процессов явлений обмена веществами между почвой и другими природными телами.

Многие почвообразовательные процессы — в особенности микропроцессы и многие явления, относящиеся к области об-

мена веществами и энергией между почвой и другими природными телами, — протекают со значительной скоростью, вполне измеримой в годовом и даже суточных циклах. Из этого вытекает ~~четвертый~~ принцип: необходимо изучать и измерять многие признаки и свойства почв в их изменчивости во времени.

В этих случаях приходится применять стационарные методы, о которых будет сказано ниже.

Состав и свойства почвы существенно варьируют в пространстве даже в пределах одного и того же наиболее дробного контура на карте, который представляется «вполне однородным» при самом тщательном и точном картировании. Из этого факта вытекает пятый принцип: любое исследование почвы должно включать в себя статистическое изучение варьировемости изучаемых свойств и состава почвы в пространстве.

Учитывая разработку понятия о конкретном почвенном индивидууме («педоне») и методов его выделения и характеристике (Козловский, 1970) следует считать желательным и даже необходимым объектом исследования конкретный педон или несколько одинаковых педонов.

Общий почвообразовательный процесс складывается из очень большого числа почвообразовательных микропроцессов. Задача исследования заключается не только в том, чтобы разобраться в сущности этих отдельных микропроцессов, но и в их взаимной связи. Из этого вытекает шестой принцип — необходимость комплексности исследований. Эта комплексность должна быть не только внутренней, т. е. охватывающей процесс, протекающий в самой почве, но и внешней, т. е. охватывать и явления взаимодействия (обмен веществами и энергией) между почвой и другими природными телами.

Седьмой и последний принцип исследования, общий для всех естественных наук, — необходимость количественного (мера и вес) выражения результатов исследования.

Рассмотренные принципы должны соблюдаться при любом исследовании почв. Однако их значение при изучении микро- и макропроцессов, конечно, неодинаково.

СРАВНИТЕЛЬНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ

Посвящая эту работу вопросу о методах почвоведения, нельзя не остановиться на истории этого вопроса.

Как хорошо известно, первым и в течение длительного промежутка времени почти единственным или во всяком случае самым главным методом исследования в почвоведении был метод, названный Л. И. Прасоловым (1939) «сравнительно-географическим». Этот метод ведет свое начало от В. В. Докучаева. Так, в «Русском черноземе» (соч., т. III, стр. 296), приведя таблицу с данными об изменении мощности гумусового горизонта и содержании гумуса в 5 точках от Грязей до Царицына, и констатируя закономерное уменьшение обеих названных величин с севера на юг, Докучаев пишет: «Более идеальной правильности и постепенности в изменении свойств почв и их географии невозможно и желать».

В той же работе (стр. 233) В. В. Докучаев списывает почвенную карту Херсонской и Бессарабской губерний, составленную Гроссул-Толстым. На этой карте указанная территория разделена на «.. четыре полосы (здесь и далее курсив Докучаева), вытянутые с запада на восток почти параллельно северному берегу Черного моря». Закончив рассмотрение карты Гроссул-Толстого, Докучаев отмечает: «Стоило академику Рупрехту вникнуть в одно это правильное распределение (с севера на юг) почв в Херсонской и Бессарабской губерниях, чтобы признать за климатом величайшее значение в вопросе об образовании почв».

Обобщение подобных фактов позволило В. В. Докучаеву в конце «Русского чернозема» высказать следующее суждение (стр. 439):

«Фактическую опору весьма сильному влиянию климата на характер растительно-наземных почв составляют, по нашему мнению, следующие факты: 1. Упорное следование черноземной полосы (взятой в целом) не вдоль параллелей, а с юго-запада на северо-восток, как раз параллельно известным изотермам, известному распределению метеорных осадков...»

Значительно позднее, в 1891 г. в своей «Объяснительной записке к проекту Почвенного комитета» (Соч., т. III, стр. 110) Докучаев пишет:

«В России имеются почвы, занимающие притом огромные пространства, которые образовались и теперь находятся под влиянием самых разнообразных условий климата, растительности и животных, минерального характера подпочв, возраста, рельефа и высоты местности и пр. и пр. А все это, несомненно, имеет весьма важное значение в правильном развитии идей и стройной системы почвоведения, так как для истинного познания всякого естественно-исторического тела необходимо изучить по возможности все условия, влиявшие на его образование и характер, необходимо пользоваться именно *сравни-*

тельным методом исследования данного тела, в различной среде, при наличии разнообразнейших форм географических данных».

Сравнительно-географический метод в его первоначальной форме сыграл огромную роль в развитии почвоведения. Это видно уже из одного такого факта, что роль климата, как одного из самых мощных факторов почвообразования, была впервые установлена В. В. Докучаевым именно на основе применения этого метода. Равным образом выделение основных типов почв было сделано В. В. Докучаевым тоже при преимущественном применении того же метода. В дальнейшем, в руках таких выдающихся почвоведов, как К. Д. Глинка, С. А. Захаров, Л. И. Прасолов, А. И. Бессонов, С. С. Неуструев, Б. Б. Полынов и др., этот метод послужил мощным орудием развития почвоведения. Роль этого метода в ту пору тем значительнее, что другие методы были развиты слабо, в том числе и сравнительно-аналитический, а задачи исследования были сравнительно просты.

Нами (Роде, 1947) сравнительно-географический метод оценен преимущественно коррелятивным. Иными словами, этот метод заключается в установлении связи существования определенных типов почв, обладающих определенными свойствами и составом, с определенными географическими условиями, что дает нам право предположить, что такое сосуществование не случайно и что в его основе лежат причинные связи, которые и следует искать. Эти факты сосуществования определенных почв с определенными географическими условиями и сопоставление состава и свойств почв с объективными характеристиками этих условий, служили для исследователей основой и для построения соответствующих гипотез, касающихся генезиса почв. Однако точного однозначного ответа на вопрос о сущности генезиса почв, равным образом, как и вопроса о сущности указанных выше связей, сравнительно-географический метод не дает.

Примерно также оценивается сравнительно-географический метод И. П. Герасимовым и М. А. Глазовской (1960). В их труде этот метод получил наиболее подробную характеристику. Эти авторы (стр. 8) пишут:

«...основным методом научного исследования почв должно быть всестороннее изучение почвы и всех основных факторов (или агентов) почвообразования. В почвоведении такой метод уже сравнительно давно был назван естественноисторическим или сравнительно-географическим. Его сущность заключается в сопряженном (параллельном) изучении почв и окружающих их природных условий; в тщательном анализе всех изменений

в строении, свойствах и географическом расположении различных почв в связи с изменениями комплекса природных условий или отдельных факторов почвообразования (климат, условия рельефа, состав материнских пород, характер растительности и т. д. ...», затем (стр. 161):

«Сущность его (комплексного географического метода полевого исследования. курсив мой. — А. Р.) заключается в сопряженном неразрывном изучении почв и факторов, их образующих.»

«Нет сомнения, что многие почвенные и климатические явления находятся в тесной коррелятивной взаимной связи (курсив мой. — А. Р.). Выяснение подобного рода связей представляет интересную и важную задачу научного исследования. Однако большая сложность и многосторонность связей почвенных и климатических явлений (имеющих не только прямой, но и косвенный характер) весьма затрудняет проведение подобных исследований... *Метод почвенно-климатических корреляций по существу не может рассчитывать на всесторонний охват таких связей* (курсив мой. — А. Р.); он оперирует лишь с частными связями между отдельными почвенными и климатическими явлениями. Более общий охват этих связей может быть найден лишь на путях широкого почвенного географического анализа, в ходе которого будут сопоставляться (курсив мой. — А. Р.) все главнейшие свойства почв, и прежде всего их водные и тепловые режимы со всеми наиболее важными и характерными особенностями климата (стр. 207—208).

В цитированных высказываниях И. П. Герасимова и М. А. Глазовской содержится очень точная, как нам кажется, характеристика сравнительно-географического метода. Сам метод заключается в «...сопряженном неразрывном...» изучении почв и факторов почвообразования, за которым следует всего лишь только «сопоставление» почв и факторов почвообразования и поиски связей между изменением почв и факторов. Правда, к этому названные авторы добавляют, что «...генетическую сущность такой связи (почв с факторами почвообразования. — А. Р.) или закономерности следует, конечно, раскрыть путем дальнейшего углубленного анализа почвообразовательного процесса (курсив мой. — А. Р.) и его направления и выяснить влияние отдельных факторов или их совокупности» (там же, стр. 295).

В этой цитате особенно важно признание необходимости «дальнейшего углубленного анализа почвообразовательного процесса». Однако, в чем этот анализ должен заключаться — остается неизвестным. Более того, на стр. 299 своего труда авторы пишут:

«Полученные же после проведения анализов данные при правильном предварительном прогнозе обычно подтверждают, уточняют и дополняют полевые диагнозы. Именно это ожидается, как правило, от аналитической обработки».

Таким образом, анализ почв, который является основным источником объективной информации об их составе, свойствах и происхождении, оказывается лишенным самостоятельного значения и ему отводится лишь второстепенное место как дополнительного, подсобного метода. Основным же методом, по мнению авторов, остается сравнительно-географический.

Согласиться с такой точкой зрения, конечно, нельзя; особенно принимая во внимание, что книга И. П. Герасимова и М. А. Глазовской появилась в свет в 1960 г., т. е. в то время, когда в исследование почв уже было внедрено значительное число новейших методов. Эти методы позволили обнаружить в почве огромное количество новых свойств, новых явлений, широко использованных в книге, которые, однако, никакими самыми скрупулезными «полевыми диагнозами» не могли быть вскрыты.

Анализ сравнительно-географического метода был бы не полон, если бы мы не упомянули о попытках объективизации этого метода, основанных на разработке количественных показателей, характеризующих климат с точки зрения его влияния на почвообразование и различные индексы Е. Мартона (Marltonne, 1926), К. Торнтвейта (Tornthwaite, 1931), С. Энена (Henin, Aubert, 1945) и др.

Однако все эти показатели оказались несовершенными. Значительно удачнее и интереснее результаты исследований акад. В. Р. Волобуева (1953), разработавшего учение о гидро- и терморядов почв и гидро-термотипов почв, основанные на анализе «почвенно-климатических ареалов» на координатной сетке осадки — температура.

В целом для современного этапа развития методов исследования генезиса почв характерно все большее и большее повышение роли и удельного веса в изучении почв, в исследовании их состава и свойств и непрерывно протекающих в них процессов («жизни» почв) с их количественной оценкой. Это направление постепенно вытесняет прежнее, для которого характерным было недостаточно глубокое изучение самих почв (главным образом морфологическое), почти полное отсутствие использования результатов стационарного изучения почвенных процессов и замена этого последнего изучением лишь внешних условий, в которых протекает «жизнь» почвы.

В настоящее время общие климатические данные (температура воздуха, количество осадков и т. д.) во все большей мере

замещаются данными о водном и тепловом режимах самих почв. Роль растительности постигается (хотя, может быть, и не полностью) через изучение обмена веществ в системе почва — растительность, через исследование строения корневых систем и их масс, а «жизнь» почвы познается через изучение состава почвенных растворов, почвенного воздуха, деятельности микрофлоры и почвенной фауны (беспозвоночных) и т. д.

Выявление новых типов, подтипов, родов и видов почв, познание процессов их образования во все большей и большей мере основывается на аналитических методах (что и было заведано нам В. В. Докучаевым).

Коррелятивный подход, лежащий в основе сравнительно-географического метода, оказывается уже недостаточным, особенно для решения генетических вопросов, т. е. для познания сущности почвообразования. В этой области сравнительно-географический метод может обеспечить лишь косвенный подход, основанный на догадках по принципу *cum hoc ergo propter hoc*, в то время как аналитические и стационарные методы и методы моделирования вскрывают самую природу тонких и сложных явлений и их причинную связь между собой.

В особенности должна быть подчеркнута неполнота учета биологического фактора. Его роль в сравнительно-географическом методе конкретизировалась преимущественно в рамках состава высшей растительности, ответственной за круговорот зольных элементов азота. Жизнедеятельность же почвенных микроорганизмов и беспозвоночных, которые собственно говоря являются непосредственными агентами вовлечения в почвообразование радиационной энергии, превращенной высшими растениями в энергию химическую, — вовлечения, которое осуществляется этими организмами в процессе разложения растительных остатков, — сравнительно-географическим методом оставалась почти не учтенной.

Некоторые последние исследования, в том числе работы Т. В. Аристовской (1965, Аристовская и др., 1967, 1968), позволяют предположить, что непосредственная роль микроорганизмов в распаде и превращении минералов значительно больше, чем мы думали до сих пор. Не в этой ли роли микроорганизмов кроется появление таких «абсурдных географических парадоксов» (Герасимов, 1966), как существование «субтропических подзолов» на черноморском побережье Кавказа или «лесных черноземов» под лиственными лесами Сибири и Монголии? И столь ли уж парадоксальны эти факты?

Стоит припомнить, что В. В. Докучаев не боялся таких «парадоксов». Упоминания о «Сочинском подзоле» (Соч., т. VI,

стр. 442), Докучаев пишет, что эта почва выглядит как «...типичный северный подзол... ничем не уступающий своим северным собратьям. Итак, почти рядом с азалиями и лавровишнями, при температуре Сочи могут образовываться почвы глухой, холодной, но вечно сырой тайги».

Иными словами, учет внешних географических условий развития и существования почв при решении генетических вопросов во все возрастающей мере заменяется исследованием и сравнением всего того, что присуще непосредственно самим почвам, т. е. их состава, свойств и режимов (современных микропроцессов). Отыскивание коррелятивных зависимостей во всей большей мере при этом замещается нахождением причинных связей.

В целом сравнительно-географический метод превращается в метод сравнительно-генетический, основанный на синтезе результатов, получаемых методами сравнительно-аналитическими, стационарным и моделирования, подробно о которых будет сказано ниже, но с учетом и внешних условий почвообразования.

Вместе с тем изучение географических условий существования почв сохраняет все свое значение для географии почв, являющейся одним из важнейших разделов почвоведения, который заключается в нахождении закономерностей распределения почв на земном шаре сопряженного с их генетическими особенностями.

С. С. Неуструев (1930, стр. 15) писал об этом:

«В русской науке со времен В. В. Докучаева прочно утвердилось понятие о почве как географическом объекте, т. е. закономерное распределение почв по земной поверхности... Поэтому география почв (разрядка Неуструева) является важной частью науки о почве, наряду с учением о физико-химических свойствах почвы, о ее морфологии и генезисе».

С учетом всего сказанного никак нельзя согласиться с мнением И. П. Герасимова и М. А. Глазовской о том, что почвоведение является «...коренной географической дисциплиной...», как пишут они в предисловии к своей книге.

Созданное В. В. Докучаевым почвоведение было, есть и будет коренной естественно-исторической дисциплиной, в которой основное место занимает учение о почве как природном теле. При этом, конечно, один из важных разделов почвоведения — география почв, т. е. учение о распределении почв на земном шаре, его закономерностях и его связи с физико-географическими условиями.

В заключение сказанного о сравнительно-географическом методе и его эволюции нельзя не отметить, что новым подхо-

дом к изучению почв, основанным преимущественно на изучении их вещественного состава и материальных свойств мы более всего обязаны акад. К. К. Гедройцу. Этот замечательный исследователь не только заложил основы коллоидной и физической химии почв. Он сделал чрезвычайно много для приобщения почвоведения к точным естественно-историческим наукам, положив начало широкому применению в нем количественных методов, и впервые создал руководство по химическому анализу почв (Гедройц, 1909), которое в быстро нарастающем объеме выдержало три издания при жизни автора и еще два — после его кончины (1923, 1929, 1932, 1935, 1960).

В этом и заключается бессмертная заслуга К. К. Гедройца, которая дает нам право связывать с его именем начало новой эпохи в развитии докучаевского почвоведения, как об этом писал Б. Б. Полынов (1933).

В развитии методов изучения почв очень велика роль Г. Н. Высоцкого, реализовавшего в широких размерах идею Докучаева о необходимости изучения «жизни почв» (Докучаев, Сочин., стр. 179) и положившего начало своими глубокими исследованиями сначала в Велико-Анадолу, а позднее и в других точках, развитию стационарного метода изучения почв. Большое значение в этом отношении принадлежит также и исследованиям А. А. Измаильского (1949).

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЧВ

Полное изучение почв и почвообразовательных микро- и макропроцессов требует изучения всех четырех фаз, из которых состоит почва. Однако при изучении разных фаз преимущественное или даже исключительное значение приобретают разные методы. Равным образом для изучения разных фаз преимущественное значение приобретают разные источники информации из числа указанных выше.

Рассмотрим, прежде всего, методы исследования общих и частных почвообразовательных макропроцессов, изучать которые целесообразно совместно. Основным объектом изучения всегда должен быть общий макропроцесс. Это требование обусловлено тем, что образование любого генетического горизонта всегда бывает сопряжено с образованием соседних с ним горизонтов. Главный метод изучения общих макропроцессов — сравнительно-аналитический — как раз и основан на сравнении состава и свойств горизонтов в пределах всего профиля.

Общие и частные почвообразовательные макропроцессы протекают, как правило, с очень малыми скоростями, в силу чего непосредственное из года в год наблюдение над ходом этих процессов, т. е. установление изменений, возникающих в почве в результате завершения их годовых циклов — неосуществимо. Мы можем устанавливать и исследовать лишь суммарные результаты этих процессов за значительные промежутки времени, измеряемые по меньшей мере многими десятилетиями, а чаще столетиями и даже тысячелетиями. Поэтому основной метод изучения макропроцессов — метод сравнительно-аналитический. Он заключается в сравнении вещественного состава и материальных свойств твердой фазы каждого из почвенных горизонтов, с одной стороны, и материнской породой — с другой. Таким образом, устанавливаются изменения в твердой фазе, возникшие в результате почвообразования, т. е. в результате как превращения веществ, входящих в состав почвы, так и их передвижения в почве. Эти изменения и служат основой для суждения о природе процессов почвообразования.

Рассмотрим те приемы объективной характеристики твердой фазы почв — их состава и свойств, которыми мы располагаем.

Здесь, прежде всего, должны быть названы приемы морфологического изучения почв, — самые старые и самые первые в истории почвоведения, но за последние десятилетия получившие новое развитие в форме микроморфологии. Создал ее В. Кубиена (Kubiéna, 1938). Микроморфология получила дальнейшее развитие в трудах Р. Брюера (Brewer, 1964) и других исследователей.

В современной совокупности морфологические методы позволяют создать представление об общем строении профиля почвы как системы морфологических горизонтов в целом. Внешние особенности этих горизонтов (цвет, структура, гранулометрический состав, определенный органолептическим методом, плотность, сложение, различные новообразования, как например, конкреции, выделения солей, стяжения карбонатов, присыпки, примазки и т. д.) позволяют высказать ряд предположений о качественных (переходящих отчасти в количественные) отличиях этих горизонтов по химическому составу, в особенности в отношении накопления органического вещества, миграции и сегрегации окислов железа и марганца, явлениях их восстановления и окисления, содержания и распределения карбонатов, гипса и легкорастворимых солей. Большое значение имеет наличие разного вида конкреций, стяжений и скоплений железа, конкреций солей и карбонатов,

свидетельствующих о многих явлениях миграции и превращения веществ, совершавшихся в почве на протяжении истории ее развития, например, о бывшем высоком стоянии уровня грунтовых вод или, наоборот, — о их современном повышении, о смене растительного покрова и связанного с ним животного мира, о бывшей большой мощности гумусового горизонта и т. д.

Все эти данные позволяют составить предположительные суждения о характере как современного почвообразования, так и об особенностях исторического развития почвы.

Микроморфологический метод исследования почв значительно расширяет и углубляет эти суждения. Он позволяет обнаруживать признаки ориентирования и передвижения глины, натечные образования, присутствие мелких конкреций и стяжений, которые ускользают от невооруженного глаза, выявляет внутреннее строение конкреций всех размеров и любого состава и организацию материала внутри структурных отделностей и между ними и т. д.

В целом морфологическое изучение почвы дает представление о строении ее профиля, о ее гранулометрическом составе (хотя бы качественное), о некоторых явлениях превращения, передвижения и перераспределения различных компонентов почвенной массы в профиле почвы в целом и в отдельных ее горизонтах и о принадлежности почвы к тому или иному типу, подтипу и т. д.

Очень важное усовершенствование морфологического метода — внедрение в практику исследования объективной характеристики окраски почв путем применения стандартных цветовых шкал. Это усовершенствование, уже широко распространенное за рубежом, должно быть внедрено и в СССР.

Физические свойства

Почва обладает рядом свойств, называемых физическими. Эти свойства непосредственно не зависят от химического состава, хотя косвенно многие из них с ним связаны.

При изучении генезиса почв их физические свойства могут быть условно подразделены на три группы по признаку их значимости.

К первой группе относятся свойства (и признаки), которые существенно изменяются в процессе почвообразования и которые могут и должны быть сами по себе использованы при его изучении непосредственно для суждения о сущности и особенностях почвообразования.

К таким свойствам относятся пористость (П), дифференциальная пористость (ДП), объемный вес (ОВ), удельная

поверхность (УП), максимальная гигроскопичность (МГ), максимальная адсорбционная влагоемкость (МAB), цвет почвы. Первые три (П, ДВ и ОВ) могут служить признаками переупаковки частиц почвы, их агрегирования, пептизации, оглинивания, обогащения гумусом и т. д. Такие свойства, как УП, МГ и МAB, характеризуют собою (наряду с гранулометрическим составом, о котором речь ниже) дисперсность почвенной массы и ее изменения в процессе почвообразования. Эти изменения могут быть следствием распада и выноса илистых и коллоидных частиц, их новообразования и обогащения гумусом и т. д. Цвет почвы служит качественным признаком перераспределения в почве окиси железа и марганца (красные, бурые и желтые тона), явлений их восстановления (зеленые, сизые и голубые тона), а также новообразования и перераспределения гумуса (черные и серые, а иногда — в гумус-иллювиальных подзолах — черновато-красные тона).

Вторую группу составляют физические свойства, имеющие, если можно так выразиться, преимущественно служебный характер и используемые в качестве количественных параметров — «констант» при стационарном изучении современных почвенных процессов и режимов. К ним относятся следующие свойства: водно-физические — полная (ПВ), капиллярная (КВ) и наименьшая (НВ) влагоемкости, диапазон активной влаги (ДАВ), водопроницаемость, влагопроводность, влажность завядания (ВЗ), водоподъемная способность (мощность капиллярной каймы), кривые зависимости потенциала или давления почвенной влаги от влажности почвы, изотермы сорбции водяного пара; тепловые свойства (теплосемкость, теплопроводность, температуропроводность) и воздушные (воздухоемкость, воздухопроводность).

Возможно, некоторые из этих свойств, относящихся ко второй группе, могут быть как-то непосредственно связаны с процессом почвообразования и служить признаками для суждения о его особенностях и его сущности. Однако до сего времени примеров такого их использования не было.

К третьей группе относятся свойства, имеющие по преимуществу прикладной характер. Таковы физико-механические свойства: твердость, липкость, текучесть, пластичность и т. д. Они используются преимущественно для решения вопросов, связанных с механической обработкой почвы или использованием ее в качестве фундамента дорожного полотна, здания и т. д. К этой же группе относится и электропроводность почвы.

Для всех рассмотренных физических свойств почвы существуют хорошо известные методы их определения, их подробно рассматривать не будем. Укажем только, что существующие

методы оказываются трудно приложимыми к почвам, содержащим значительное количество камней. Имеются заслуживающие внимания попытки разработки методов изучения физических свойств каменистых почв (например, Зайдельман, 1957), но в целом эти методы еще ждут окончательной разработки.

Большинство методов определения физических свойств довольно грубы и поэтому обладают высокой точностью. Многие из них обладают также значительной динамичностью в пределах коротких промежутков времени, например, водопроницаемость, влагопроводность и другие величины, которые зависят от влажности почв. Такие свойства приходится характеризовать кривыми, изображающими их изменчивость во времени, в зависимости от влажности и других условий. Таким образом, эти свойства твердой фазы находятся в зависимости и от содержания жидкой фазы.

Некоторые из этих свойств в своем количественном выражении не связаны со сложением почвы. Таковы, например, максимальная гигроскопичность, максимальная адсорбционная влагоемкость, удельная поверхность, теплоемкость и др. Другие же, наоборот, находятся в тесной зависимости от сложения почвы, в силу чего определять их можно только на образцах почвы с ненарушенным естественным сложением. Таковы объемный вес, водопроницаемость и влагопроводность, все виды влагоемкости, пористость, тепло- и температуропроводность и др. Кроме того, некоторые свойства, как, например, все тепловые, зависят от влажности почв.

Почва обладает еще группой свойств, которые принято называть физико-химическими (емкость обмена, кислотность с различными ее формами, ненасыщенность основаниями и т. д.). В отличие от физических свойств физико-химические свойства непосредственно связаны с химическим составом почвы: содержанием в ней обменных ионов водорода и алюминия, суммой обменных катионов и т. д. Поэтому эти физико-химические свойства целесообразно рассматривать в разделе о химическом составе почв.

Гранулометрический состав почв

Гранулометрический анализ почв, помимо общей гранулометрической ее характеристики в целом и данных для ее отнесения в ту или иную классификационную группу по гранулометрическому составу, дает еще очень много для суждения о распаде, перераспределении и новообразовании в профиле, выносе из него различных гранулометрических компонентов почвенной массы — главным образом ее наиболее мелких

фракций, — ила и коллоидов. Эти суждения основаны уже на количественных данных, в силу чего они отличаются необходимой объективностью и позволяют находить некоторые частные-количественные характеристики степени развития почвообразовательного процесса или некоторых его элементов, как, например, степени выноса тонких частиц из подзолистого горизонта, степени накопления их в иллювиальном горизонте и т. д.

Гранулометрический состав почв характеризуется с помощью соответствующих шкал размера частиц. В СССР принята шкала: 1 — 0,5 — 0,25 — 0,1 — 0,05 — 0,01 — 0,005 — 0,001 мм, обладающая тем существенным недостатком, что при переходе от одной фракции к другой знаменатель шкалы попеременно изменяется от 2 до 5 и в результате создается неравномерность в группировке. Размер частиц уменьшается то в два, то в пять раз.

В этом отношении шкала Аттерберга, принятая во многих зарубежных странах (2 — 0,6 — 0,2 — 0,06 — 0,02 — 0,006 — 0,002 мм), гораздо рациональней, так как имеет постоянный знаменатель прогрессии, равный

$$0,1 \sqrt{10} = 0,316 \approx 0,3$$

Вероятно, следует подумать об усовершенствовании в этом направлении и советской шкалы с сохранением в качестве основных величин единиц и введением в качестве промежуточных величин троек, т. е. принять шкалу: 1 — 0,3 — 0,1 — 0,03 — 0,01 — 0,003 — 0,001 мм. Такая шкала будет более равномерной и, в частности, облегчит графическое изображение гранулометрического состава.

Кроме того, следует сделать попытку привести в возможно более точное соответствие шкалу гранулометрического состава с минералогическим составом почв отдельных гранулометрических фракций.

Необходимо всемерно рекомендовать доводить определение гранулометрического состава до коллоидной фракции, приняв за ее верхнюю границу 0,0033 или 0,0001 мм.

Заслуживает внимания усовершенствование существующих и разработка новых, быстрых методов гранулометрического анализа, в частности, методов непрерывного анализа.

Агрегатный и микроагрегатный состав почв

Методы агрегатного и микроагрегатного анализа почв имеют своей целью дать объективную характеристику

агрегатного состояния почвы. Основной прямой метод такого анализа — просеивание почвы через систему сит с отверстиями различного, постепенно уменьшающегося диаметра. Просеивание бывает как «сухим», так и «мокрым». Наибольший интерес представляют результаты мокрого просеивания, поскольку они дают представление о содержании в почве водоустойчивых агрегатов разного размера.

Однако водоустойчивость агрегатов в большинстве случаев относительна и зависит от условий мокрого просеивания. Поэтому для получения сравниваемых результатов необходимо создать постоянство указанных условий, что достигается с помощью механизации анализа, которая обеспечивает постоянство продолжительности соприкосновения почвы с водой, постоянство скорости прохождения воды через анализируемый образец и т. д. Тщательное соблюдение всех этих условий позволяет получать хотя и условные, но все же сравнимые характеристики агрегатного и микроагрегатного состояния почвы.

Валовой химический состав почв

Определение валового химического состава почв до недавнего времени было самым главным и почти единственным методом для суждения об общем характере почвообразовательного макропроцесса. Это свое значение данный вид анализа сохраняет и по настоящее время, хотя за последние десятилетия появилось несколько новых методов (химических и физических), существенно его дополняющих.

При так называемом «полном» валовом химическом анализе почвы в ней определяется общее содержание Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, Mn, Cl, S, P и потеря при прокаливании. В последнюю входит содержание гумуса, а также химически связанной воды и углекислоты карбонатов, если они имеются в почве.

Особо определяется еще содержание микроэлементов Zn, Mo, J, Co, Se, Cu, Ba, Pb, В и др.

Отдельно определяется также валовое содержание азота. По поводу валового химического элементарного состава (который обычно приводится в форме содержания окислов, сумма которых должна быть близка к 100), можно сделать два главных замечания.

Во-первых, существенный недостаток анализа в проведенном выше виде — отсутствие разделения содержания железа на Fe^{3+} и Fe^{2+} , т. е. отсутствие определения содержания двувалентного железа. Этот недостаток лишает нас возмож-

ности количественного объективного суждения о степени разницы в почвах оглеения, глееватости и других степеней и форм проявления восстановительного (временного или постоянного) режима. Между тем эти явления играют огромную роль в образовании почв многих типов. Введение в практику валового анализа определения Fe^{2+} (наряду с определением его «легкоподвижных форм») позволило бы вскрыть и количественно охарактеризовать природу многих особенностей гидроморфного почвообразования, о которых в настоящее время мы можем лишь высказывать малообоснованные догадки. При этом следует, конечно, учитывать, что часть Fe^{2+} входит в состав первичных минералов.

Второе замечание касается так называемой химически связанной воды. В настоящее время ее принято определять по разности: потеря при прокаливании минус содержание гумуса и содержание карбонатной углекислоты. Метод этот, несомненно, недостаточно корректен, так как о содержании гумуса мы судим по содержанию углерода, умножая его на постоянный условный коэффициент, который, несомненно, не может быть одинаковым для всех почв. Однако все же, в особенности для горизонтов с малым содержанием гумуса, этот метод дает удовлетворительные результаты. Поэтому неправильно то, что за последние годы почвоведы, публикуя валовые анализы почв, перестали включать в таблицы данные о содержании химически-связанной воды, ограничиваясь лишь приведением суммарной величины потери при прокаливании. В особенности содержание химически-связанной воды важно при анализе состава илистой и коллоидной фракций, так как ее величина может дать ценные дополнительные сведения о минералогическом составе названных фракций. Определение химически-связанной воды при валовом «химическом анализе почв» должно считаться обязательным. На большое значение «компонентной воды», т. е. воды, закрепляемой в веществах, слагающих географическую оболочку, указывал и акад. В. Р. Волобуев (Волобуев и Кулешов, 1961, 1970).

Кроме валового химического состава почвы в целом, широко практикуется и является существенным и полезным дополнением к нему валовой химический состав различных гранулометрических фракций — в особенности илистой и коллоидной. Этот вид анализа часто применяется в сокращенном виде, с определением только 7 элементов: Si, Al, Fe, Ca, Mg, K и Na, а также потери при прокаливании и гумуса. Валовой состав этих фракций имеет большое значение при решении вопроса о минералогическом составе ила и коллоидов. Следует отметить недостаточность практикуемого часто определения валового

вого химического состава только ила, без одновременного определения состава коллоидной фракции. Недостаточность такого подхода определяется тем, что минералогический состав ила и коллоидной части нередко бывает различным, прежде всего за счет содержания в предколлоидной фракции кварца. Поэтому необходимо обязательно отдельно определять валовой химический состав коллоидов и предколлоидной фракции.

Определение отдельных химических соединений

Кроме валового химического состава почвы в целом и отдельных гранфракций, имеются методы определения отдельных химических соединений. К ним прежде всего должно быть отнесено определение различных простых солей: хлоридов, сульфатов, карбонатов и бикарбонатов (а иногда и нитратов) Ca, Mg и Na. Эти соли в природной обстановке в той или иной своей части находятся в составе почвенного раствора и лишь частично — в твердой фазе. Непосредственно определяются не сами соли, а их ионы: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Ca^{2+} и Na^+ , а иногда и K. Легко растворимые соли-хлориды и нитраты всех трех катионов, сульфаты Mg^{2+} , K и Na, карбонат и бикарбонат Na определяются в водных вытяжках. Суммарное содержание иона SO_4^{2-} , т. е. входящего не только в состав сульфатов натрия и магния, но и в состав значительно менее растворимого гипса — определяется отдельно, так как при содержании его в почве свыше 1% веса почвы в водную вытяжку 1:5 гипс полностью не переходит. Поэтому суммарное содержание SO_4^{2-} (неточно называемое обычно «содержанием гипса») определяется путем обработки почвы соляной кислотой с полным отмыванием SO_4^{2-} . Этот прием тем более важен, что, как показала И. М. Рашевская (1954), кристаллы гипса нередко бывают покрыты оболочкой из карбоната кальция, которая препятствует растворению гипса в водной вытяжке.

Валовое содержание названных ионов простых солей может быть условно пересчитано на содержание самих солей: NaCl, Na_2SO_4 и т. д.

Весьма слабо растворимые в воде карбонаты Ca^{2+} и Mg^{2+} определяются путем определения карбонатной углекислоты при обработке почвы соляной кислотой. В тех случаях, — довольно частых, — когда в почве содержится только карбонат кальция, карбонатная углекислота может быть пересчитана непосредственно на содержание CaCO_3 . Вопрос — имеет ли почва только карбонат кальция — решается следующим образом. Солянокислую вытяжку готовят не только из образ-

цов из карбонатных горизонтов, но и из образцов слоев, лежащих выше, и определяют в ней содержание Ca^{2+} и Mg^{2+} . Если количество Mg^{2+} при переходе от некарбонатных горизонтов к карбонатным существенно не изменяется, то можно считать, что в почве заключен карбонат только кальция. При одновременном содержании карбонатов и Ca и Mg, содержание карбонатной CO_2 условно пересчитывается в содержание CaCO_3 и MgCO_3 путем распределения CO_2 между Ca и Mg — пропорционально содержанию Ca и Mg, переходящих в солянокислую вытяжку.

Однако последний пересчет допустим лишь тогда, когда в почве нет гипса.

Далее следует назвать методы определения различных отдельных «форм» некоторых элементов. Все эти методы более или менее условны, а определяемые с их помощью формы элементов — обычно не вполне определены с точки зрения их химического состава и минералогической природы.

Здесь прежде всего должны быть упомянуты широко распространенные методы определения «подвижных» или «легко растворимых» форм Al и Fe. Эти методы могут быть разделены на две группы: кислотные методы определения подвижных форм обоих этих элементов и восстановительные методы определения подвижного железа.

«Подвижное железо» содержится в очень многих почвах и грунтах и при этом в довольно значительных количествах, главным образом, вероятно, в виде гидроокисей с неопределенным количеством воды, т. е. в форме $\text{Fe}^{3+}(\text{OH})_n$, а иногда быть может и $\text{Fe}^{2+}(\text{OH})_n$. Кроме того, не исключена возможность нахождения в почве Fe_2CO_3 и обменного иона Fe^{2+} . Алюминий может содержаться в форме гидроокиси и обменных ионов. Эти формы железа и алюминия частично переходят в слабые растворы различных кислот — как минеральных, так и органических. Применение более или менее концентрированных растворов минеральных кислот недопустимо, так как они вызывают разрушение некоторых глинистых минералов. Применение слабых растворов минеральных кислот (например, 0,05 н. HCl) нецелесообразно, так как в процессе реакции заметно меняется pH раствора. Поэтому наиболее целесообразны растворы органических кислот с анионами, дающими комплексные ионы с Al^{3+} , Fe^{3+} и Fe^{2+} . Вследствие образования комплексных анионов ионы железа и алюминия уходят из сферы реакции и последняя может идти до конца, что повышает полноту растворения гидроокиси. Указанные растворы бывают забуферены с помощью солей тех же кислот. Наиболее стар и популярен из этих методов так назы-

ваемый реактив О. Тамма (Tamm, 1922), представляющий собою нормальный раствор щавелевой кислоты, забуференный оксалатом аммония.

Для извлечения «подвижных форм» не силикатного железа были предложены восстановительные методы. С их помощью железо восстанавливается и в форме двухвалентного переходит в раствор. В настоящее время широко применяется метод Мира и Джексона (Mehra and Jackson, 1959), в котором восстановителем служит дитионит натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) в сочетании с цитратом натрия. Данный метод, в частности, применяется для снятия железистых пленок с частиц различных, в том числе и глинистых минералов, при подготовке образцов почв к рентгеновскому анализу.

Другими методами являются метод Деба (Deb, 1950), Джеффриса (Defries, 1946), Дроздова (Drosdoff, 1935) и др.

Все эти методы определения «подвижных» форм железа и алюминия, повторяем, условны, прежде всего из-за неопределенности химического состава тех форм полуторных окислов, которые встречаются в почвах, неопределенности их «возраста», степени гидратированности и т. д.

Весьма желательно было бы провести методическое исследование по сопоставлению многочисленных методов определения названных форм полуторных окислов между собой для решения вопроса о том, какие же из этих методов наиболее рациональны. К такому методическому исследованию следует привлечь методы минералогии и физической химии.

Далее необходимо упомянуть метод определения «аморфного кремнезема», предложенный акад. К. К. Гедройцем и заключающийся в обработке навески почвы при нагревании на бане 5%-ным раствором КОН. Этот раствор, вероятно, разрушает в какой-то мере и частицы алюмосиликатов, а также растворяет гидроокись алюминия. Поэтому в найденное в растворе количество кремнезема вносится поправка на кремнезем, перешедший в раствор вследствие разрушения частичек алюмосиликатов. Поправка в классической прописи метода, данной К. К. Гедройцем, вычисляется по количеству найденного в растворе алюминия. Считается, что растворению подверглись алюмосиликаты с формулой каолинита $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Найдя путем соответствующего пересчета количество кремнезема, связанного с глиноземом, и вычтя его содержание из общего количества кремнезема, обнаруженного в растворе, находят содержание «свободного» (аморфного) кремнезема. Этот, тоже условный, метод следует уточнить. Во-первых, из найденного количества Al_2O_3 надо вычесть то его количество, которое могло быть в почве в форме свободной гидроокиси.

Оно может быть определено с помощью вытяжки Тамма. Во-вторых, вычисляя количество связанной кремнекислоты, следует исходить не из формулы каолинита, а из состава илистой фракции, и применять отношение $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$, равное не 2, а то, которое найдено в илистой фракции и которое в почвах, развитых на сиаллитных породах, обычно превышает 3. Впрочем, следует иметь в виду, что в щелочную вытяжку переходят также аллофаны, в которых молекулярное отношение $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ может быть и иным, чем в илистой фракции.

Существуют химические методы определения кремнекислоты, содержащейся в почве в форме кварца с помощью обработки почвы фосфорной кислотой или фторно-борной кислотой. Точность этих методов неизвестна.

Существует еще метод определения кварца с помощью вытяжки из почвы смесью трех концентрированных: соляной, серной и азотной кислот (Роде, 1934). В этой смеси растворяются все глинные минералы и часть первичных. Обработка трехкислотной смесью сопровождается последующей обработкой 2%-ным раствором соды для удаления кремнекислоты, перешедшей в раствор и выпавшей в осадок. В остатке остаются главным образом кварц и полевые шпаты. Проведя валовой анализ остатка, можно рассчитать содержание в нем полевых шпатов путем умножения содержания Al_2O_3 на коэффициент 3,6, соответствующий молекулярному отношению $6\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, характерному для кислых полевых шпатов. Найденное таким образом содержание связанной кремнекислоты вычитают из найденного в остатке от обработки трехкислотной смесью. Разность соответствует содержанию кварца.

Анализы, относящиеся к исследованию почвенного коллоидного («поглощающего» или «обменного») комплекса

Почвенный коллоидный комплекс состоит из двух частей — «анионной» и «катионной». Анионная часть представлена гумусом, предколлоидной и коллоидной гранулометрическими фракциями. О валовом анализе этих фракций уже говорили. Добавим лишь желательность выделения этих фракций из почвы с помощью только механического растирания, без применения химических методов пептизации. Соответствующие методы были описаны Р. Х. Айдиняном (1960) и Н. И. Горбуновым (1963). Химические методы — в особенности сопровождаемые применением кислот — могут разрушать коллоидный комплекс. В случае необходимости удалить карбонаты Ca и Mg это можно сделать путем обработки почвы

нейтральным раствором какой-нибудь соли аммония — например, хлористого.

Катионная часть коллоидного комплекса представлена обменными катионами: Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{K}^{\oplus}$, Na^+ , H^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} и полимерными катионами гидроокиси алюминия. Кроме определения содержания этих обменных катионов определяют еще емкость обмена непосредственно, а также и различные формы кислотности.

В отношении этих анализов следует сделать следующие замечания.

Во-первых, до сего времени нет вполне надежных методов определения содержания обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} в присутствии карбонатов этих ионов и тем более в присутствии гипса и легкорастворимых солей.

Во-вторых, существует несколько ^{не}согласованных друг с другом методов определения форм кислотности почв. Таковы: метод определения обменной кислотности К. К. Гедройца с помощью раствора хлористого бария, метод неполного (однократная вытяжка) определения обменных ионов водорода и алюминия по А. В. Соколову; метод определения гидролитической кислотности с помощью однократной вытяжки с последующим умножением на эмпирический коэффициент 1,70 — общий для всех почв; метод определения гидролитической кислотности путем промывания до конца; методы определения рН в водной и солевой суспензиях; метод определения кислотности по выделению углекислоты из карбоната кальция, внесенного в почву; метод кривых титрования почвенной суспензии и другие.

Следует считать совершенно необходимой постановку работы по сопоставлению и согласованию всех этих методов определения кислотности с целью выработки единого метода или системы методов, в отношении которой будет точно известно, что эти методы дают и в каком соотношении находятся друг с другом получаемые с их помощью величины.

При разработке этой методики следует строго учитывать величину рН, при которой производится определение. Основной метод должен быть рассчитан на определение кислотности при $\text{pH} = 7$, с применением буферных растворов. Это не исключает применения дополнительных методов специального назначения, например, при определении потребности почвы в известковании — определения кислотности при $\text{pH} = 8,4$, при котором вместе с тем полностью нейтрализуются полимерные катионы гидроокиси Al .

Кроме определения содержания отдельных катионов, весьма желательно, а во многих случаях и обязательно при-

мос определение емкости обмена. Это особенно необходимо в тех случаях, когда почва может содержать воднорастворимые формы соли указанных катионов. Например, в лесных подстилках могут содержаться растворимые соли Ca^{2+} . При определении обменных катионов обычными методами эти соли переходят в фильтрат и определяются как обменные катионы, тем самым преувеличивая и содержание последних и емкость обмена. Прямое определение емкости обмена должно производиться с помощью буферных растворов солей Ca^{2+} или Ba^{2+} при $\text{pH} = 7$ и при $\text{pH} = 8,4$.

Методы определения содержания органического вещества и его фракционного состава

Химические методы определения общего гумуса известны давно — это «метод мокрого сжигания» Кнопа и метод сухого сжигания Густавсона. Оба метода дают общее содержание органического углерода, по которому, с помощью соответствующего эмпирического коэффициента, находится количество органического вещества (гумуса).

Не так давно предложен метод Штрелейна для сухого сжигания, в котором количество выделившейся CO_2 определяется волюмометрическим методом. Метод этот, по-видимому, очень быстр и заслуживает проверки и внедрения. Он описан в «Методическом руководстве по изучению почвенной структуры» (1969).

В тридцатых годах И. В. Тюрин (1931) подробно разработал титриметрический метод определения содержания общего органического вещества, при котором непосредственно определяется количество кислорода, расходуемое на окисление органического вещества при «мокром сжигании». Содержание органического вещества («гумуса») находится затем тоже путем умножения на эмпирический коэффициент.

Таким образом, все эти методы служат косвенными определениями содержания гумуса. При этом титриметрический метод обладает еще тем недостатком, что в нем суммарно учитывается количество кислорода, расходуемое на окисление и органического вещества и некоторых восстановленных минеральных соединений — например, соединений закисного железа.

Раззером был предложен (Rather, 1917) метод определения органического вещества, основанный на разрушении алюмосиликатной части (в особенности глинных минералов, содержащих химически-связанную воду) с помощью обработки

почвы фтористоводородной кислотой и последующем прямом определении органического вещества путем определения потери от прокаливании остатка от обработки плавиковой кислотой. Однако этот метод не привился.

Таким образом, все перечисленные методы определения «гумуса» являются, собственно говоря, определениями углерода, находящегося в составе органических соединений, или количества кислорода, необходимого для окисления органического вещества. Соответствие получаемых величин именно «гумусу» зависит от степени очистки образцов почвы от органических остатков растений (главным образом мелких корешков), которая, конечно, никогда не бывает полной и совершенной и зависит от опытности лица, производящего эту очистку.

И. В. Тюрин, М. М. Кононова, В. В. Пономарева и Л. Н. Александрова в СССР разработали систему анализов для определения фракционного состава гумуса. Применение этой системы методов позволяет определить, во-первых, главные компоненты гумуса — гуминовые кислоты, фульвокислоты, гумин и вещества, экстрагируемые органическими растворителями — битумы и смолы. Кроме того, эта система дает возможность расчленить общее содержание гуминовых кислот и фульвокислот на фракции главным образом по признаку их связи с различными минеральными компонентами: кальцием, железом и алюминием.

При всей несомненной высокой полезности перечисленных методов, все они все же условные и в известной мере эмпирические. Получаемые с помощью соответствующих обработок результаты в большой степени зависят от концентрации применяемых реактивов, температуры и продолжительности воздействия. Кроме того, эта условность и эмпиричность методов в значительной мере зависит, вероятно, также и от недостаточно выраженной индивидуальности определяемых соединений и наличия между ними переходных форм. Однако, несомненно, строгое соблюдение разработанных прописей анализов позволяет все же получать данные весьма полезные для решения генетических вопросов и диагностики почв.

Нами кратко рассмотрены химические методы химического анализа почв. В настоящее время в почвоведении начинают внедряться новые, преимущественно физические методы химического анализа, например, пламенной фотометрии, спектральный, инфракрасной спектроскопии, радио-активационный, атомно-сорбционный, полярографический магнитно-ядерного резонанса и др. Однако широко распространены (особенно для определения калия и натрия) пока лишь методы фотометрии пламени и спектральный (для микроэлементов).

Минералогический состав почвы

Методы определения минералогического состава почв делятся на две главные группы, применительно к природе минералов. Этому отвечает и их приуроченность к гранулометрическим фракциям разного размера. Поэтому обязательный прием подготовки почвы к минералогическому анализу — ее разделение на различные гранулометрические фракции. Обычно разделяют почву на следующие фракции (мм): 1—0,25; 0,25—0,1; 0,1—0,05; 0,05—0,01; 0,01—0,005; 0,005—0,001; 0,001—0,0002 и $< 0,0002$.

Из этих восьми фракций первые пять обычно анализируются с помощью поляризационного микроскопа с применением иммерсионного метода. Вспомогательным приемом служит предварительное разделение гранулометрических фракций на две или несколько фракций по удельному весу с помощью тяжелых жидкостей (бромформ, жидкость Туле и т. д.). Анализ заключается в подсчете под микроскопом числа частиц разных минералов, без определения их веса, в силу чего этот метод не является строго количественным.

Фракция $< 0,001$ мм, предпочтительнее после разделения ее на фракции 0,001—0,0002 мм и $< 0,0002$ мм и после очистки частиц от железистых пленок, анализируются рентгеновским методом, термогравиметрическим, электронографическим, электронно-микроскопическим и методом ИКС.

Совокупность всех этих методов, в сочетании с результатами валового химического состава всех фракций, дает возможность установить природу минералов и их приближенное количество. Для определения кварца существует особый количественный термический метод.

При дальнейшем совершенствовании методов анализа минеральной части почв твердой фазы необходимо выработать систему методов, которая позволит характеризовать состав почвы по преимуществу содержанием в ней определенных химических соединений, включая минералы. Такая система должна основываться на сочетании химических, минералогических, физико-химических и физических методов.

Заканчивая на этом краткое рассмотрение методов изучения вещественного состава почв, напомним еще раз, что они относятся почти исключительно к твердой фазе почвы, которая, в силу свойств, присущих ее компонентам, главным образом частицам силикатных и алюмоферрисиликатных минералов, изменяется наиболее медленно — несравненно медленнее, чем почвенный раствор и тем более почвенный воздух,

а также потому, что при взятии и высушивании образцов почвы, предназначенных для аналитического исследования, и раствор и воздух теряются, нелетучие компоненты раствора и живой фазы присоединяются к твердой фазе, не влияя существенно на ее состав, ввиду их малого содержания в почве.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВООБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ МАКРОПРОЦЕССОВ

Изучение почвообразовательных макропроцессов совершается по преимуществу с помощью сравнительно-аналитического метода. При этом имеются в виду три допущения.

Во-первых, первоначальная, исходная, материнская порода, из которой образовалась изучаемая почва, первоначально была вполне однородной.

Во-вторых, тот слой почвы, который мы принимаем в настоящее время за «исходную» или «первоначальную» породу, в течение всего периода становления, развития и существования почвы существенно не изменялся.

В-третьих, процесс почвообразования все время шел в одном и том же направлении.

Нетрудно видеть, что все три допущения (в особенности второе и третье) едва ли когда-нибудь осуществляются полностью.

Однако имеющийся опыт показывает, что при тщательном отборе материала и исключении случаев неоднородности материнской породы другие два допущения существенных ошибок в результат исследования не вносят. Что же касается второго допущения, то во многих случаях однородность материнской породы, прослеживаемая на более или менее значительную глубину, позволяет предположить, что вся ее толща, если и изменялась, то равномерно. Это могло быть только в том случае, если эти изменения были незначительными, ибо в противоположном случае в породе должна была бы возникнуть та анизотропность, которая характерна для собственно почвенной толщи. Иначе говоря, однородность «материнской породы» доказывает если не полное, то почти полное затухание воздействия почвообразовательных агентов (раствор, воздух, корни и микроорганизмы) на эту «породу».

Кроме того, существует еще несколько объективных признаков для суждения об однородности породы, описанных в монографии Ф. Е. Бира (Beag, 1964):

1. Одинаковость содержания по профилю в различных

гранулометрических фракциях размером от 2 до 0,1 мм устойчивых минералов, в особенности тяжелых (например, циркона).

2. Неизменность по профилю отношения содержания двух устойчивых минералов в одной и той же гранулометрической фракции (например, циркона к турмалину во фракции 0,05—0,02 или альбита к кварцу во фракции 2—1 и 1—0,5 мм).

3. Неизменность по профилю содержания крупных частиц, рассчитанного на суммарное содержание фракции > 1 мк.

Установив различия в составе и свойствах между отдельными почвенными горизонтами, с одной стороны, и материнской породой — с другой, исследователь далее должен выяснить природу и сущность тех конкретных микропроцессов, в результате которых возникли установленные различия.

В этих поисках исследователь может прибегнуть к учету факторов и условий почвообразования, влиявших на образование почвы, в особенности климата и рельефа, от которых в наибольшей степени зависит гидротермический режим почвы, а также состав высшей и низшей растительности и почвенной фауны.

Другими словами говоря, сравнительно-аналитический метод может применяться в сочетании со сравнительно-географическим, которому в прошлом почвоведение обязано многими достижениями и успехами.

Последний метод критически разобран выше. Метод основан преимущественно на коррелятивных взаимосвязях и поэтому не может давать однозначные ответы на почвенно-генетические вопросы.

Пользуясь сравнительно-аналитическим методом и стремясь к раскрытию существа тех почвенных явлений, которые привели к образованию данной почвы, исследователь опирается, кроме того, еще и на закономерности, известные из области физики, химии и биологии (в широком значении этих понятий). Эти закономерности в большинстве случаев устанавливались на гораздо более простых системах, нежели почва, а нередко и весьма далеких от нее по своей природе. Это обстоятельство также препятствует нахождению однозначных ответов на вопрос о сущности реальных почвообразовательных микропроцессов или их сочетаний, которые способствовали возникновению установленных отличий в составе и свойствах почвенных горизонтов от породы. В результате создается широкий простор для высказывания различных домыслов, догадок и предположений, что ведет к развитию субъективизма и волюнтаризма.

Хороший пример такой ситуации — вопрос о природе образования почв с профилем подзолистого типа. Одни исследователи считают, что глинные минералы при подзолообразовании разрушаются обычными низкомолекулярными органическими кислотами. Другие тоже допускают разрушение глинных минералов, но ответственными за это считают гумусовые вещества—фульвокислоты. Третьи связывают этот распад с непосредственным влиянием специфических микроорганизмов. Четвертые держатся той точки зрения, что глинные минералы вообще не разрушаются и что вымывание их частичек происходит без распада (лессиваж). В настоящее время ни одна из этих гипотез не может считаться бесспорно доказанной, равным образом как ни одна из них не подлежит безусловному отрицанию.

Аналогичные примеры могут быть найдены и из области вопросов генезиса почв других типов.

Иными словами, даже наиболее полный и богатый информацией источник — вещественный состав и материальные свойства почвенных горизонтов, подвергнутый сравнительно-аналитическому исследованию, с соблюдением всех семи сформулированных выше принципов и с учетом физико-географических условий, может послужить основой лишь для построения большего или меньшего числа более или менее всерьезных гипотез о том, какие же именно почвообразовательные процессы и их сочетания привели к образованию данной почвы.

Эти гипотезы могут проверяться путем непосредственного изучения микропроцессов стационарными методами, с которыми познакомимся ниже, и методами моделирования.

Говоря об изучении макропроцессов, мы до сих пор имели в виду преимущественно минеральную часть почвы, которая образуется из минеральной массы первоначальной материнской породы, состав и свойства последней, с определенными допущениями, считались нам известными.

Органическая же часть почвы, начиная от момента поступления растительного опада и кончая полной минерализацией органических соединений, находится в несколько ином положении.

Циклы полного превращения органических веществ, судя по появившимся за последнее время еще очень немногочисленным радиоуглеродным датировкам, измеряются величинами порядка сотен и тысяч лет. Следует, впрочем, отметить, что методика применения радиоуглеродного метода к исследованию возраста почв разработана недостаточно, в силу чего интерпретация получаемых данных часто оказывается небезупречной, неоднозначной, произвольной.

Представляется вероятным, что в накоплении гумуса участвуют процессы с циклами разной продолжительности, многократно налагавшиеся друг на друга, в результате чего в составе гумуса одновременно присутствуют гумусовые вещества различного возраста.

Материнская горная порода, за редкими исключениями, если и содержит органическое вещество, то в ничтожном количестве. Исходным веществом для образования гумуса служит органический опад растений. Количество последнего нарастает медленно, по мере развития растительности и почвы, если оно начинается с примитивных стадий на плотных породах. Если почвообразование начинается на более или менее мощной толще рыхлой породы, количество опада по мере развития растительности и почвы растет быстрее, равным образом как и запас гумуса. Ежегодно какое-то количество гумуса образуется, какое-то разлагается.

Начиная наблюдения на сформированной почве, исследователь стремится, на фоне имеющегося уже запаса гумуса, обнаружить и измерить вновь образовавшееся за год его количество, а также определить то его количество, которое полностью разлагается за год.

Учитывая, что запас гумуса в 10—20 раз и более может превышать величину ежегодного опада и, следовательно, в 25—50 раз и более превышает количество новообразующегося при его разложении гумуса, нетрудно понять, что задача, стоящая перед исследователем, практически неразрешима.

Одни прямые определения содержания гумуса и его химического и фракционного состава в разные моменты годового цикла здесь дадут очень мало — в лучшем случае представление лишь о режиме содержания гумуса в почве. Поэтому отдельные стадии процесса гумусообразования и с качественной стороны, и с количественной остаются пока неясными. Вероятно, здесь могут помочь методы моделирования, в особенности сопровождаемые применением органических соединений, содержащих меченый углерод и кислород.

Все сказанное выше свидетельствует о том, что сравнительно-аналитический метод и сам по себе, и в сочетании со сравнительно-географическим методом, хотя и является до сих пор основным при решении почвенно-генетических задач, и, в частности, при изучении общих и частных почвообразовательных макропроцессов, но получаемые с его помощью представления о сущности этих процессов, как правило, не однозначны.

Говоря о методах изучения частных и общих почвообразовательных макропроцессов, следует указать, что в некоторых,

очень немногих, случаях к изучению частных макропроцессов может быть и непосредственно применен метод стационарный. Пример такого случая — формирование поверхностных органогенных горизонтов: лесной подстилки, степного войлока (но не торфа). Формирование этих горизонтов нельзя изучать сравнительно-аналитическим методом, так как материалом для их образования служит не материнская горная порода, а органические остатки, количество и состав которых год от года может меняться. Кроме того, «жизнь» этих горизонтов протекает со значительной скоростью. В силу этого познание существа их формирования и количественная характеристика этого процесса могут осуществляться только стационарным методом, путем непосредственного изучения превращения отдельных порций растительного опада с количественной его характеристикой в течение всего времени существования этой порции. Во всех остальных случаях стационарные методы исследования для изучения других общих и частных макропроцессов применяются не непосредственно, а через изучение микропроцессов. О возможности применения моделирования к решению этих вопросов скажем ниже.

При изучении общих макропроцессов весьма полезный прием обработки аналитических данных — подсчет б а л а н с а вещества, который может применяться и к химическому и к гранулометрическому, и к минералогическому составу. Построение баланса отдельных окислов или разных гранулометрических фракций покоится на тех же трех допущениях, на которых основывается применение сравнительно-аналитического метода и о которых говорилось несколько выше. Для составления баланса делаем еще одно дополнительное допущение а именно предполагаем, что какая-то составная часть почвы в процессе почвообразования остается неподвижной, т. е. не подвергается никаким превращениям, ни приносу в почву ни выносу из нее, или если и подвергается, то в ничтожной степени. Выбор такого «свидетеля» делается обычно по признаку относительного (по сравнению с другими составными частями) наибольшего его накопления в почве — обычно в верхних ее слоях, где явления выноса могут быть выражены в наибольшей степени. Чаще всего в качестве такого свидетеля используется кварц, хотя и этот минерал не может считаться вполне устойчивым. Кроме того, мельчайшие его частички могут выноситься механически. Было предложено также использование в качестве «свидетелей» некоторых других минералов — циркона, турмалина и граната.

Зная объемный вес всех горизонтов, в том числе и «неизменной материнской породы», и содержание в них всех сос-

тавных частей, в том числе и «свидетеля», подсчитывают запасы последних в каждом горизонте на всю его толщу и на какую-то произвольно выбранную площадь — например, 1 дм² или 1 м². После этого, исходя из предположения о неподвижности «свидетеля», подсчитывают исходный запас каждого окисла в каждом горизонте по формуле:

$$A_1 = A_0 \frac{Q_1}{Q_0},$$

где A_1 — исходный запас окисла в горизонте, A_0 — его запас в слое материнской породы произвольной мощности, Q_0 — запас свидетеля в таком же слое породы и Q_1 — запас свидетеля в горизонте, для которого ведется расчет.

Вычитая из величины A_1 найденный фактически в горизонте запас той или иной составной части, находят величину его прихода или потери. Примеры такого подсчета можно найти в статье А. А. Роде и И. Д. Седлецкого (1939), А. А. Роде и И. М. Рашевской (1968), а также в статье П. Кундлера (Kundler, 1959) и др.

Составление таких балансов не только дает общую количественную характеристику макропроцесса, но и позволяет часто разобраться в существе явления — например, отличить накопление ила в горизонте В за счет оглинивания *in situ* от его приноса из вышележащих слоев.

Остается еще рассмотреть вопрос о применении при изучении макропроцессов вариационной статистики. Необходимость этого диктуется тем, что почвы обладают значительной пространственной вариабельностью, даже в пределах одного и того же самого мелкого таксона и в пределах небольшого, казалось бы вполне однородного, контура.

Поэтому нельзя характеризовать ни один из почвенных горизонтов каким-то только одним образом, хотя бы он и был самым тщательным образом выбран на глаз, т. е. лишь по морфологическим признакам, как «средний». На самом деле он может оказаться и действительно близким к среднему, но может оказаться и более или менее сильно отклоняющимся как в сторону максимума, так и в сторону минимума значения интересующего нас показателя. При этом разные параметры могут в одном и том же образце отклоняться от среднего в разной степени и даже в разные стороны.

Поясним: говорим осторожно «могут» потому, что в целом этот вопрос еще мало изучен, несмотря на свой большой методический и теоретический интерес и еще большее практическое значение, например, для диагностики почв. Только в самые последние годы начали появляться исследования, посвя-

щенные изучению варьирования почв и обработке полученных результатов (Дмитриев, 1966, 1967, 1970 а, б, в; Медведев, 1966, Карпачевский и др., 1968; Аринушкина и др., 1968; Дмитриев, Манучарова, 1968; Афанасьева, Панфилов, 1969; Иванушкина, Карпачевский, 1969; Важенин и др., 1969; Пузаченко и др., 1970; Соколов, Таргульян, 1970; Козловский, 1970; и др.). Всесоюзное общество почвоведов выпустило в 1970 году очень ценный специальный сборник «Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения».

Однако в целом применение вероятностно-статистических методов к изучению почв находится еще на самых ранних стадиях разработки. Не будем разбирать этот вопрос во всем его объеме — это предмет особого исследования. Ограничимся лишь несколькими замечаниями.

Статистическая обработка данных, характеризующих свойства и состав горизонтов (слоев) почвы, позволяет получить следующие главнейшие результаты.

1. Средние значения интересующих нас величин и характеристику степени их варьирования и точности их определения при определенной вероятности.

2. Выяснить — подчиняется ли исследуемый ряд величин нормальному распределению.

3. Определить степень однородности ряда.

4. В результате исследования неоднородности почвенного покрова выявить «почвенный индивидум («педон») и разработать методы его нахождения и характеристики. В этой области особенно интересна работа Ф. И. Козловского (1970).

5. Выявить объективные критерии классификации почв и оценить относительное значение каждого из классификационных признаков.

6. Разработать объективные методы диагностики почв

7. Найти объективные коэффициенты корреляции между различными признаками.

8. Находить необходимое число повторностей для определения той или иной величины с определенной заданной точностью и вероятностью.

9. Исследовать вопрос о точности различных методов, применяемых при анализе почв.

Этот перечень результатов, достигаемых с помощью приложения статистической обработки, несомненно, не полон: он охватывает лишь главнейшее.

Основным методом изучения почвообразовательных макропроцессов мы называли сравнительно-аналитический. Очевидно, в простейшей постановке приложение этого метода тре-

бует статистической характеристики каждого из почвенных горизонтов или даже отдельных их слоев в отношении вариабельности всех тех свойств и элементов, которые намереваемся использовать для сравнительно-аналитической характеристики всего профиля.

Основная величина, получаемая в результате статистической обработки данных — среднее значение интересующего нас признака.

В связи с использованием средних величин возникают некоторые методические вопросы. Можно заложить некоторое число почвенных разрезов, взять из каждого разреза колонку образцов одинакового поперечного сечения, подвергнуть образцы необходимым анализам, а затем вычислить средние арифметические значения показателей для каждого горизонта (слоя) почвы и таким образом получить характеристику «среднего профиля». Законен ли этот прием и достаточен ли он?

Отвечая на первый из этих вопросов, отметим прежде всего, что полученный «средний профиль» представляет собою нечто в природе не существующее. Это определяется тем, что в природе варьируют и мощности горизонтов (слоев) и величины, характеризующие их состав и свойства. Поэтому полученный «средний профиль» будет «фиктивным».

И тем не менее, однако, получение описанным путем «среднего профиля» — прием вполне законный для решения некоторых вопросов. Например, если исследуется засоленная почва и надо определить в ней запас солей, с целью хотя бы количественной характеристики скорости процесса соленакопления в данной почве, то только путем нахождения «среднего профиля», включая средний состав грунтовой воды, можно решить интересующий нас вопрос с достаточной точностью. Тем более это относится к тому случаю, когда нужно рассчитать количество воды, необходимое для удаления из почвы солей, т. е. для ее промывки.

Столь же законен этот прием будет и для случая изучения, скажем, почвы подзолистого типа, если захотим подсчитать общее количество различных составных веществ (ил, кремнезем, железо и т. д.), вынесенных из элювиальных горизонтов и накопившихся или новообразовавшихся в «иллювиальных» горизонтах, т. е. общий баланс процесса.

Во всех подобных случаях нахождение «среднего профиля» — единственный метод точного количественного решения поставленных вопросов.

Столь же законен этот метод и для целей диагностики почв, так как только этим путем, располагая средними значениями, а также всей статистической характеристикой средних, можно получить обладающие вполне определенной, известной нам, точностью величины тех параметров, с помощью которых диагностируем почвы. Только таким образом можно покончить, наконец, с произволом и субъективизмом, которые до сего времени существуют в этом вопросе. Точной количественной диагностики почв до сего времени нет.

Перейдем к другому поставленному выше вопросу — достаточен ли статистический прием нахождения «среднего профиля» для решения любого генетического вопроса.

На этот вопрос ответ следует дать, по-видимому, отрицательный. Допустим, что исследуется подзолистая почва. Хорошо известно, что профиль подзолистой почвы даже морфологически обычно очень неоднороден. В особенности это относится к горизонтам $A_0A_1A_2$ и A_2B , границы между которыми имеют, как правило, извилистую форму, а сами горизонты — изменчивую мощность, а иногда также и степень выраженности.

В этих случаях изменения мощности и глубины залегания, а также степени выраженности различных горизонтов часто бывают друг с другом коррелятивно связаны. Такая коррелятивная связь (она может быть и положительной и отрицательной) естественна. Она свидетельствует о том, что любой горизонт в своем происхождении как-то связан с лежащими выше и ниже. И чтобы охарактеризовать эту связь, а затем выяснить ее природу, необходимо исследовать отдельно несколько вертикальных колонок, представляющихся нам хотя бы по морфологическим признакам однородными и отвечающих различным встречающимся сочетаниям мощностей и других признаков. Сопряженный анализ последних в пределах каждой колонки позволит выявить те взаимные зависимости между отдельными горизонтами, которые влияют на их формирование.

При этом может быть рассчитан и «средний профиль» — путем осреднения данных, относящихся к отдельным колонкам. Если колонки разного типа (в смысле соотношения в них мощностей горизонтов, расположения их границ и т. д.) окажутся имеющими неодинаковое распространение в профиле (что может быть установлено, скажем, путем осмотра профиля в длинной траншее), то при вычислении «среднего профиля» должен быть применен метод вычисления среднего взвешенного, с учетом степени распространения колонок разного типа.

Изучение почвообразовательных микропроцессов

Микропроцессы отличаются от макропроцессов, прежде всего тем, что непосредственно наблюдать их можно преимущественно в жидкой, газобразной и живой фазах, в то время как о ходе макропроцессов мы судим по изменениям твердой фазы. Второе существенное отличие заключается в том, что большинство микропроцессов отчетливо циклично, причем длительность циклов не велика — в большинстве случаев в пределах от одних суток до одного года или немногих лет. Это позволяет надеяться, что непосредственными наблюдениями и исследованиями могут быть охвачены полностью целые циклы с начала до конца, со всеми подробностями.

В микропроцессах участвуют все четыре фазы, но скорость изменений, совершающихся в твердой фазе, как известно, незначительна. Наоборот, в газообразной, жидкой и в живой фазах содержится много веществ, которые могут испытывать очень быстрые изменения под влиянием микропроцессов, в которых они участвуют, причем многие из этих веществ сами являются продуктами микропроцессов. По своей природе эти вещества очень разнообразны, будучи представлены преимущественно воднорастворимыми минеральными, органическими и органо-минеральными, а также газообразными соединениями.

Поэтому для изучения микропроцессов применяется стационарный метод. Он заключается в непосредственном, прямом изучении микропроцессов на относительно небольшом однородном участке почвы (стационаре) в течение более или менее длительного отрезка времени. Как правило, должны организовываться многолетние исследования (около 10 и более лет), что позволяет охватить наблюдениями разные сочетания погодных условий.

Основная непосредственная задача стационарных исследований заключается в познании сущности микропроцессов и их количественной характеристике. Это выполняется путем изучения режимов: водного, теплового, солевого и газового, режима состава почвенного раствора, состава некоторых компонентов коллоидного комплекса, окислительно-восстановительного режима и в особенности — жизнедеятельности живой фазы.

Напомним, что под режимом какого-либо соединения мы понимаем совокупность всех явлений его новообразования в почве, его поступления в почву из смежных природных тел (атмосфера, грунт, живое вещество), его распада в почве и его выноса из почвы.

Критерий возможности полного изучения режима какого-либо компонента состава почвы — возможность нахождения полного баланса этого компонента (Арманд, 1947).

Режим любого соединения в количественной форме может быть выражен балансовым уравнением такого вида:

$$Q_t = Q_0 + (a_1 + a_2 + a_3 \dots + a_n) - (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + \dots + b_n).$$

где Q_0 — содержание соединения в начальный момент времени;

Q_t — его содержание в момент времени « t ».

$(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \dots + a_n)$ — количественно охарактеризованные явления новообразования и поступления его в почву (или в какой-либо ее слой);

$(b_1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n)$ — количественно охарактеризованные явления расхода и разложения того же соединения из почвы (или какого-либо ее слоя).

Чем меньше промежутки времени « t », через которые осуществляются указанные измерения и наблюдения, тем получается более подробная картина изменения содержания и его причин.

Следовательно, чтобы установить и количественно охарактеризовать режим какого-либо компонента, необходимо периодически измерять его содержание и одновременно же количественно охарактеризовать явления его новообразования, расхода, прихода и превращения его в другие соединения. Вот эти последние явления и составляют существо почвообразовательных микропроцессов.

Такова должна быть постановка стационарных исследований в их теоретическом аспекте.

Практически их осуществление наталкивается на некоторые серьезные трудности — принципиальные и технические.

Главная принципиальная трудность заключается в том, что в почве одновременно совершается очень большое число разнообразных микропроцессов. Современное состояние науки не обеспечивает нам возможности даже распознавания и тем более характеристики очень многих образующихся в почве соединений, а также явлений их новообразования и исчезновения (распад, вынос или усвоение живыми высшими и низшими организмами).

Поясним это следующим примером.

Допустим, нас интересует вопрос о режиме нигратного азота, т. е. иона NO_3 . Причинами изменения содержания этого иона в том или ином почвенном горизонте могут быть: 1) его новообразование (a_1); 2) его поступление из атмосферы с осадками (или из вышележащего горизонта с просачиваю-

щимся раствором) (a_2); 3) его усвоение растениями (b_1); 4) его усвоение микроорганизмами (b_2); 5) его восстановление (денитрификация) (b_3); 6) его вымывание в нижележащие слои почвы или в грунтовые воды (b_4).

Измерив начальное и конечное содержание нитратного иона Q_0 и Q_t , можно составить уравнение:

$$Q_t - Q_0 = (a_1 + a_2) - (b_1 + b_2 + b_3 + b_4).$$

Из величин, входящих в это уравнение, можно непосредственно определить Q_0 , Q_t , a_2 и в некоторых случаях b_4 . Последние две величины могут определяться с помощью лизиметров или колонок Кауричева — Поздруновой, а также сбора и анализа атмосферных осадков.

Методами раздельного непосредственного определения величин a_1 (новообразование NO_3), b_1 (усвоение NO_3 растениями), b_2 (усвоение NO_3 микроорганизмами), b_3 (денитрификация) при одновременном и совместном протекании этих микропроцессов мы пока не владеем.

Перепишем уравнение так, чтобы в левой его части оказались члены известные, а в правой — неизвестные:

$$Q - Q_0 - a_2 + b_4 = a_1 - (b_1 + b_2 + b_3).$$

Очевидно, уравнение с четырьмя неизвестными решить нельзя.

Этот пример иллюстрирует тот случай, когда одновременное протекание нескольких различных микропроцессов лишает нас возможности расчленить их и исследовать каждый в отдельности. Как показывает опыт, такая ситуация возникает очень часто.

Даже в таком простом, казалось бы, явлении, как режим углекислоты в почвенном воздухе, приходится сталкиваться с одновременно идущими явлениями новообразования CO_2 (в результате дыхания корней, микробиологического разложения органических остатков и дыхания почвенных животных), ее выделения из почвенного раствора, ее выделения из почвы в атмосферу, ее поглощения грунтовыми водами и обратным выделением из них. Вычленить каждое из этих явлений и дать ему количественную характеристику пока невозможно ввиду отсутствия соответствующих методов. Поэтому ограничиваемся лишь периодическими определениями содержания CO_2 в почвенном воздухе и количественными определениями ее выделения в атмосферу.

Однако бывают случаи, когда оказывается возможным составление и полного баланса, характеризующего все микропроцессы, связанные с режимом интересующего нас компонента.

Например, для воды можно количественно охарактеризовать следующие микротроцессы: поступление влаги в почву из атмосферы и грунтовых вод, испарение, десукцию, поверхностный, почвенный и грунтовый стоки. Обладая этими данными и данными о периодическом изменении содержания влаги в почве, можно составить полный баланс влаги в почве, а следовательно исчерпывающе осветить водный режим почвы. Полный баланс может быть составлен и для тепла.

Возникает вопрос — какие же микротроцессы — принципиально — могут быть подвергнуты полному, исчерпывающему изучению, а какие — нет

Как видели, непосредственным внешним проявлением соответствующего микротроцесса является изменение содержания того или иного соединения в том или ином горизонте почвы. Эти изменения могут вызываться двумя причинами: либо перемещением этого соединения в почвенной толще (или уходом его за пределы этой толщи), — либо же участием его в процессах превращения, при которых его содержание уменьшается или возрастает.

В почве имеются компоненты, количества которых, принимающие участие в совершающихся в ней превращениях веществ, ничтожны. Вся изменчивость их содержания обусловлена почти исключительно лишь их поступлением в почву, передвижением в ее толще и расходом из почвы. К таким компонентам относятся вода и соли (последние — при более или менее значительном их содержании в почве). Вот для этих компонентов (а равным образом для тепла) могут быть найдены балансы, более или менее полно количественно описывающие их поведение в почве. Для солей, однако, в баланс должно быть включено то количество, которое принимает участие в обмене в системе почва — растительность, что не представляет особой сложности.

Остальные соединения, встречающиеся в составе жидкой, газообразной и живой фаз могут одновременно и передвигаться в почвенной толще и подвергаться в заметном количестве различного рода химическим превращениям, исчезать и появляться вновь. И в очень многих случаях невозможно установить — что служит причиной наблюдаемых нами изменений в содержании данного соединения: его перемещение в почве или его новообразование или превращение. В таких случаях иногда можно найти лишь неполный баланс вещества, в котором будут известны только некоторые статьи его прихода и расхода.

Такое положение вещей объясняется тем, что почвенные процессы очень сложны. В почвенном растворе, почвенном

воздухе и в составе живой фазы одновременно присутствует большое количество различных соединений, природа которых и способы определения нам пока неизвестны. Эти соединения в теплое время года, при участии микрофлоры и микрофауны непрерывно образуются вновь, разлагаются, вступают друг с другом и с твердой фазой в различные реакции, передвигаются в почвенной толще, и вычленение отдельных, соответствующих, микропроцессов из всей этой массы пока не представляется возможным.

В подобных случаях иногда приходится отказываться от полной количественной характеристики режима данного компонента в целом и ограничиваться лишь периодическими определениями его содержания в почве, т. е. лишь изучением режима его содержания, без выявления причин его изменения или в лучшем случае сопровождая его лишь некоторыми дополнительными данными.

Например, в разобранном случае с режимом нитратного иона такими дополнительными данными являются количество иона NO_3 , поступающего в почву с атмосферными осадками, и количество этого иона, вымываемое в грунтовые воды (или глубокие слои почвы).

Попробуем же представить себе, какие именно режимы доступны в настоящее время нашему исследованию.

I. Полные режимы и балансы

1. Водный режим и баланс.
2. Температурный и тепловой режим и тепловой баланс.
3. Режим и баланс легко- и среднерастворимых солей (хлориды, сульфаты, карбонаты и бикарбонаты кальция, магния, натрия и калия).
4. Запасы лесных подстилок и степных войлоков.
5. Зольный обмен в системе почва — высшая растительность.

II. Режимы содержания и отдельные элементы баланса

1. Общее содержание органического вещества.
2. Валовое содержание C и N.
3. Содержание CO_2 в почвенном воздухе и ее выделение в атмосферу.
4. Содержание в почве иона NO_3 .
5. Содержание в почве иона NH_4 .

III. Только режимы содержания

Газообразная фаза

1. Кислород в почвенном воздухе.
2. Другие газы в почвенном воздухе.

Жидкая фаза

3. Состав и концентрация почвенных растворов, отжатых из почвенной массы или естественно из нее вытекающих, как-то: лизиметрических, грунтовых, почвенно-грунтовых вод.

Коллоидные компоненты

4. Состав и содержание обменных катионов.
5. Все формы кислотности.
6. Емкость обмена.

Твердая фаза

7. Агрегатное и микроагрегатное состояние.
8. Общее содержание и фракционный состав гумуса.
9. Содержание карбонатной CO_2 и глубина верхней границы вскипания.
10. «Подвижные формы» окислов Fe и Al и аморфная SiO_2 .
11. «Подвижные формы» питательных веществ.

Живая фаза

12. Количество, видовой состав и химический состав микрофлоры.
13. Количество, видовой состав и химический состав почвенной фауны.

IV. Энергия

Радиационный баланс.

Температурный режим и тепловой режим и баланс.

Режим потенциала (давления) почвенной влаги.

Режим окислительно-восстановительного потенциала.

Радиоактивность почвы.

Этот перечень не претендует на исчерпывающую полноту, но важнейшие явления он, вероятно, охватывает. Кроме того,

отдельные его разделы, несомненно, неравноценны по объему, но дальнейшая детализация сейчас может быть и не нужна. Следует только отметить, что особенно важны разделы, связанные с составом и концентрацией почвенных растворов (включая лизиметрические, почвенные, почвенно-грунтовые и грунтовые воды), составом обменных катионов (включая те, которые создают кислотность) и составом живой фазы, а также продуктами ее метаболизма, многие из которых входят преимущественно в состав жидкой фазы.

Подводя итоги сказанному о принципиальных трудностях, с которыми сопряжено изучение микропроцессов, мы видим, что к их числу относятся прежде всего трудности аналитические, связанные с распознаванием веществ, входящих в состав почвенных растворов, и количественным их определением.

Но гораздо важнее трудности, сопряженные с выявлением взаимодействий и взаимных реакций, протекающих между самими компонентами почвенного раствора, с одной стороны, между ними и твердой фазой — с другой, между ними и живой фазой — с третьей, и биологическими явлениями, протекающими в самой живой фазе — с четвертой. Однако преодоление этих трудностей тем более необходимо, что именно с ними и связано раскрытие природы важнейших микропроцессов, из которых складывается почвообразование.

К сожалению, приходится признать, что в этом преодолении мы стоим еще на самых первых ступенях и что почвообразовательный процесс в целом по содержанию и сущности пока еще в значительной мере является для нас «черным ящиком», в который мы едва только начинаем проникать. Вероятно, не будет преувеличением утверждение о том, что раскрытие тайны этого ящика требует значительного развития и расширения работ по биологии, в особенности — по микробиологии почв, или точнее — по микробиохимии, имея при этом в виду биохимическую природу (сторону) микробиологических процессов. Этот приоритет (но отнюдь не исключительность микробиологических явлений) определяется тем, что, как уже указывалось, именно через них вовлекается в почвообразование радиационная энергия, в процессе фотосинтеза трансформированная зелеными растениями в химическую.

Поэтому одна из главных, но в то же время весьма важных и крупных задач изучения почвенных режимов — установление для почв всех типов тех микробиохимических процессов, которые принимают участие в почвообразовании. Исходным для этих поисков должно быть знание состава активной микрофлоры, определяемой по методу А. В. Рыбалкиной (1957).

Сведения о составе, в сочетании с известными уже биохимическими

мическими особенностями обнаруженных видов, может подсказать нам — какие микробиохимические процессы могут протекать в данной почве. Задача эта, конечно, очень нелегкая и не простая.

Еще более сложной она представится, если принять во внимание и учет жизнедеятельности почвенной фауны беспозвоночных, также взаимодействующей с микрофлорой. Этот компонент живой фазы почв до недавнего времени был нам известен еще меньше, чем микрофлора — как со стороны видового состава, так и в еще большей степени с биохимической стороны.

Только за последние 2—3 десятилетия благодаря серии глубоких и обстоятельных исследований М. С. Гилярова и его школы значительно возросли наши знания о видовом составе почвенной фауны и ее биологии и экологии. Однако биохимическая роль беспозвоночных и сейчас еще изучена весьма недостаточно, в особенности если учесть, что для почвенных беспозвоночных пищей служат как остатки высших растений и других беспозвоночных, так и микроорганизмы. Более того, надо считаться и с обратным соотношением, когда почвенные беспозвоночные становятся пищей для микрофлоры, например, почвенные клещи поедаются плесневыми грибами (Аристовская, 1965).

Все это еще более усложняет систему биохимических процессов, разыгрывающихся в почве, без расшифровки, без распутывания их, однако, трудно разобраться в сущности почвообразования.

Между тем, все эти микробиохимические явления составляют в то же время и второй источник плодородия почв, если под первым подразумевать действие тех же микробиохимических процессов на минеральную часть почвы. И если эта первая сторона вовлекает в почвообразование массу почвенных минералов, то вторая сторона заключается в постоянно происходящей биохимической переработке массы как органических и органо-минеральных соединений, образующихся в процессе жизнедеятельности микроорганизмов и почвенных беспозвоночных, т. е. живой фазы почв, так и органического опада наземных растений, за счет которого и восстанавливается непрерывно расходующаяся масса живого вещества (живой фазы) почвы. В ходе этой переработки возникают формы питательных веществ, доступные для высших растений, за которые однако высшие растения конкурируют с теми же микроорганизмами. Таким образом, исследование названных биохимических явлений и процессов, с одной стороны, ведет к познанию сущности почвообразования, т. е. к

решению почвенно-генетических вопросов, а с другой — к пониманию происхождения и природы той главнейшей части почвенного плодородия, которая заключается в обеспечении высших растений доступными для них формами минеральных веществ и азота.

Это свидетельствует о том, что плодородие почв есть одно из проявлений процесса почвообразования, состоящего из многочисленных микрпроцессов. Следовательно, познание природы плодородия и закономерностей его возникновения, развития и существования должно быть результатом всеобъемлющего исследования генезиса почв, основанного на исчерпывающем познании системы совершающихся в почве микропроцессов — особенно биологических и биохимических.

Развитие сформулированного выше направления, в котором микробиохимические явления должны занять первое место, сопряжено, несомненно, с очень большими трудностями вследствие обилия микроорганизмов, разнообразия их жизненных функций и того обстоятельства, что масса этих микроорганизмов есть в самом буквальном смысле слова масса живого вещества, состоящего, однако, из отдельных живых индивидуумов. Эти индивидуумы непрерывно нарождаются, живут, питаются и выделяют в окружающую среду продукты своего метаболизма: витамины, ферменты и т. д. Их тела после их гибели переходят в неживую массу почвы, а составляющие их соединения становятся пищей для других индивидуумов, вновь превращающих их в живое вещество. При этом все эти бесчисленные индивидуумы существуют в очень сложном поровом пространстве почвы, заполненном водой и воздухом в меняющихся соотношениях и обладающем огромной удельной поверхностью (от нескольких квадратных метров на 1 г в песчаных почвах до сотен квадратных метров в почвах суглинистых и глинистых). В этом пространстве, кроме силы тяжести, действуют еще и другие силы — поверхностная энергия почвенных частиц и осмотические силы, сопряженные с веществами, входящими в состав почвенного раствора и с обменными катионами. В этом же сложном поровом пространстве расположены также и корни и корневые волоски высших растений, которые всасывают влагу, избирательно поглощают различные растворимые, а отчасти и нерастворимые (обменные катионы) вещества, выделяют в процессе своего дыхания углекислоту, поглощают кислород, а нередко выделяют и органические кислоты. У многих высших растений имеется микориза, которая вносит свои особенности в процессы обмена различными веществами между корнями и почвенной массой.

И корни, и микроорганизмы соприкасаются и взаимодействуют со всеми тремя неживыми фазами почвы, в том числе и с минеральными частицами, вызывая их и разрушение и новообразование (например, ортштейнов), а может быть и метаморфоз первичных и синтез вторичных минералов, а также и новообразование гумуса — явления, которые по преимуществу и слагают собою часть частных и общих почвообразовательных макропроцессов, сопряженных с превращениями веществ и энергии.

Таким рисуется почвенное тело и протекающие в нем почвообразовательные микропроцессы. Сложность этого тела и этих микропроцессов и создает большие трудности в их изучении и овладении ими. И тем не менее однако же единственный правильный научный путь развития почвоведения — разработка указанного выше направления. Оно должно обеспечить полный, исчерпывающий до конца, анализ всей сложной системы микропроцессов, ведущее место среди которых занимают процессы микробиохимические. Никаких упрощений, никаких схематизаций на этом пути допущено быть не может — он должен быть пройден до конца.

Но было бы большой ошибкой сделать из сказанного такой вывод, что до тех пор, пока все микропроцессы, лежащие в основе почвообразования во всей своей сложности и во всем своем взаимодействии не будут нами познаны до конца, — до тех пор почвоведение будет оставаться несовершенной наукой. Вся история нашей науки категорически свидетельствует против такого вывода. Совокупность методов (сравнительно-географический, сравнительно-аналитический, стационарный и моделирование), их синтез (метод сравнительно-генетический) является в настоящем достаточно мощным орудием для решения разнообразных вопросов теоретического почвоведения и его приложения к решению практических задач сельского и других отраслей народного хозяйства. Об этом весьма убедительно свидетельствует отечественная и зарубежная литература, объем которой непрерывно возрастает. Поэтому, наряду со всемерным развитием микробиологии и микробиохимии, мы должны продолжать дальнейшее развитие и других разделов почвоведения широко распространенными методами, совершенствуя и улучшая их.

Но в решении большинства теоретических вопросов почвоведения при современном состоянии науки неизбежно сохраняется в том или ином иногда значительном размере гипотетичность, исключаяющая возможность однозначного решения этих вопросов. Многозначность их решения естественно влечет за собой и множественность направлений их дальней-

шей разработки. Отсюда возникает стремление избавиться от этой многозначности и множественности, которая может быть осуществлена только путем разработки почвоведения на уровне микропроцессов, в первую очередь микробиохимических процессов, о чем говорилось выше.

Кроме важнейших принципиальных трудностей стационарных исследований, существуют трудности технические. Подробно о некоторых из них говорилось ранее (Роде, 1963). Здесь упомянем о них лишь кратко. Первая и основная из этих трудностей заключается в отсутствии стационарных приборов для большинства определений, которые, будучи однажды установлены в почву, позволили бы в дальнейшем, в течение длительного времени, вести лишь периодические отсчеты по соответствующим шкалам (как это делается, например, по шкалам термометров при изучении температурного режима почвы) или даже организовать автоматическую запись. Такими приборами в настоящее время являются лишь термометры разного типа, с помощью которых с любой частотой или даже с автоматической записью может непрерывно измеряться температура почвы, некоторые (пока еще не очень совершенные) приборы для определения влажности почвы, влажности почвенного воздуха, прибор для определения ОВП. Вероятно, можно разработать приборы для непрерывного измерения концентрации в почвенном воздухе CO_2 и O_2 , а также для измерения в почве pH. Для измерения же всех остальных интересующих нас явлений таких приборов пока не существует. Поэтому для изучения микропроцессов мы пока вынуждены делать необходимые измерения периодически, причем сами измерения выполняются чаще всего на образцах, изъятых из почвенной толщи. Эти два обстоятельства — периодичность измерений вместо непрерывной регистрации и выполнение их на изъятых из почвы образцах — вызывают понижение точности измерений и значительное увеличение трудоемкости работы. Изъятие из почвы образца лишает возможности повторить в следующий раз измерение в той же самой точке почвенной толщи, так как эта точка при каждом измерении «уничтожается» или «портится», что вынуждает проводить измерение в образце, взятом из другой точки. Это не имело бы никакого значения, если бы почва была вполне однородной, т. е. не обладала бы пространственной изменчивостью в горизонтальном направлении. А так как такая изменчивость существует, то производя измерения в следующий срок в образце, взятом в новой точке, и получив новое значение измеряемой величины, мы всегда оказываемся перед вопросом — что является причиной обнаруженного разли-

чия — действительное ли изменение величины интересующего нас параметра во времени или его пространственное варьирование. Дать простой однозначный ответ на этот вопрос нельзя. Единственное, что можно сделать — провести измерения с некоторой повторностью, обработать статистически полученные данные и исследовать также статистическими методами достоверность наблюдаемой разницы между двумя сроками наблюдения. Если эта разность превысит величину различия, которая может быть обусловлена пространственным варьированием, то она достоверна. Если же разность окажется меньше этого различия, то недостоверна. Но и в том случае, когда разность достоверна, она всегда представляет собой алгебраическую сумму двух величин: величины истинного измерения во времени измеряемого параметра (которая и интересует нас) и величины, зависящей от пространственного варьирования. Исключить вторую величину нельзя, приходится ограничиваться лишь определением ее возможного максимального значения.

Второе обстоятельство, понижающее точность и эффективность измерений, вытекает из их периодичности.

В результате периодических наблюдений вместо непрерывной регистрации, неизбежно получается в большей или меньшей степени искаженное, обедненное, схематизированное представление о наблюдаемом явлении. Единственный способ ослабления этой схематизации — увеличение частоты определений, т. е. сокращение промежутков времени между последовательными определениями. Возможность такого учащения определений зависит от степени их трудоемкости. Если для изучения, например, температурного режима требуется лишь отсчет по термометрам, что можно делать любое число раз в сутки, то определение влажности весовым методом может осуществляться при длительном периоде наблюдений и более или менее значительной (1 м и более) мощности изучаемого слоя практически не чаще 1 раза в 5 суток. Чем реже делаются определения, тем схематичней и дальше от истины получаемая картина. Поэтому разработка приборов для непрерывного измерения интересующих нас величин — единственно мыслимый и настоятельно необходимый путь повышения результативности и точности стационарных исследований.

Существует еще одна техническая трудность, которая заключается в отсутствии достаточно надежных методов количественного определения передвижения влаги, г. е. почвенного раствора.

В пределах самой почвенной толщи почвенный раствор представляет собой ту фазу, в составе которой по преиму-

щество и происходит передвижение веществ в форме ионных, молекулярных и коллоидных растворов и суспензий. Кроме количественного определения состава почвенного раствора, о чем уже говорилось выше, мы должны еще владеть методами регистрации его передвижения в почве. Задача количественного определения передвижения решается для почвенной толщи в целом сравнительно просто, на основании данных о водном балансе, о режиме влажности, выраженных в качественных категориях (ПВ, НВ, ВРК и т. д.) и о режиме уровня грунтовых вод. Данные о режиме влажности, выраженные в качественных категориях последней, могут дать некоторое качественное (в смысле определения направления) представление о передвижении влаги внутри самой почвенной толщи. Но количественное решение этой проблемы возможно, по-видимому, только путем расчета, в основу которого должны быть положены величины давления (потенциала) почвенной влаги на разной глубине и величины влагопроводности, зависящие от влажности и почвы. Эти расчеты затрудняют явления гистерезиса, требующие учета предшествующей истории увлажнения слоя почвы, для которого производится расчет, так как связь между давлением почвенной влаги и влажностью почвы не однозначна. Этот же путь расчета применим и для определения количества влаги, диссугируемой растениями. Примеры таких расчетов в работах И. И. Судницына (1958, 1966, 1970).

Вспомогательный прием учета передвижения почвенных растворов и содержащихся в них веществ — различного рода лизиметры, работающие, однако, лишь при высокой влажности почвы, и, в особенности, поглощающие колонки И. С. Кауричева и Е. М. Ноздруновой (1960), которые позволяют определять суммарные количества различных веществ, вынесенных из того или иного слоя почвы за тот или иной, обычно довольно длительный, промежуток времени.

К сожалению, все эти вспомогательные приемы позволяют регистрировать только нисходящее гравитационное передвижение растворов и содержащихся в них растворенных веществ и не регистрируют восходящего передвижения. Кроме того, лизиметрические устройства нередко вносят искажения в передвижение влаги вследствие капиллярного гистерезиса, как было в работе Е. И. Шиловой (1961).

Еще один вспомогательный метод для изучения передвижения полученных растворов — их «мечение». Он позволяет регистрировать и измерять и восходящее передвижение влаги, как было показано И. С. Васильевым и А. А. Роде (1960). Эти авторы применяли в качестве метки ион Cl^- , который по ряду причин не может считаться безупречной меткой. Боль-

шие перспективы в этом отношении сулит уже применяющееся мечение с помощью радиоактивных изотопов, как показано М. К. Мельниковой и С. В. Ковеня (1969), Керпеном и Шарпензилем (Kerpen, Sharpenseel, 1967), а также с помощью тяжелой воды (Бондарева, 1971).

Особое место в передвижении веществ в почвах занимает перемещение всей почвенной массы в целом, всех четырех ее фаз совместно. Оно осуществляется, во-первых, животными-землероями, во-вторых, при ветровале деревьев, корни которых отрывают верхние слои почвы, нередко на немалую глубину и переворачивают их. В обоих случаях, кроме перемещения почвенных масс, происходит еще и преобразование и новообразование микрорельефа, что, в свою очередь, влияет на дальнейшее почвообразование.

В-третьих, глыбы почвенной массы в целом или отдельные ее компоненты (камни) перемещаются при криотурбационных явлениях, связанных с замерзанием почв.

Наконец, должно быть учтено и такое влияние, как нормальная денудация, которая является обычным компонентом почвообразования. Она заключается в перемещении почвенной массы вниз по склону под влиянием текущей воды. В известных пределах для почв, находящихся в сельскохозяйственном пользовании, должна учитываться и ускоренная эрозия и дефляция, вызываемые неправильной хозяйственной деятельностью человека — до тех пор, однако, пока они не переходят предел, за которым процесс почвообразования сменяется процессом почворазрушения.

Что же дает стационарное изучение микропроцессов для познания частных и общих макропроцессов при современном состоянии науки? Прежде всего, полную количественную балансовую характеристику водного и теплового режима в целом и отдельных их слагаемых. Эта информация может быть дана как в форме средних, так и в многолетней динамике с вычислением параметров обеспеченности различных количественных уровней. Далее — такую же полную балансовую характеристику солевого режима (для почв засоленных, т. е. содержащих заметное количество легкорастворимых солей) и полную балансовую характеристику обмена зольными элементами в системе почва — высшая растительность. И, наконец, полную балансовую характеристику режима масс органогенных горизонтов — лесных подстилок и степных войлоков.

Результаты стационарных исследований дополняют рассмотренную выше, в разделе втором, информацию о составе и свойствах почвы, относящихся к твердой фазе, такой же информацией, относящейся к жидкой, газообразной и живой

фазам, причем количественные показатели, содержащиеся в этой информации, даются в внутрigoдовой и многолетней изменчивости.

Однако степень детальности информации, относящейся к различным компонентам последних трех фаз, различна. Наиболее полна она по отношению к газообразной фазе, простой по составу; менее — по отношению к грунтовым водам и наименее полна — к почвенным растворам и всей живой фазе в целом.

Несмотря на различную степень полноты, эта информация позволяет значительно дополнить, детализировать и уточнить те гипотезы о сущности почвообразования, которые могут вытекать из результатов применения сравнительно-аналитического метода.

Например, изучение почвенных растворов позволяет определить их состав и концентрацию. В частности, можно определить реакцию растворов, выяснить природу содержащихся в них и реагирующих с твердой фазой органических кислот и их солей, как это сделано И. С. Кауричевым и Е. М. Ноздруновой (1963).

Исследование почвенных растворов с помощью колонок И. С. Кауричева — Е. М. Ноздруновой и последующий анализ уловленных веществ дает представление о формах и составе соединений полуторных окислов с органическими веществами и о природе последних; о количествах различных воднорастворимых соединений, передвигающихся в почве; о возможности передвижения илистых суспензий.

Все это вводит нас в понимание сущности почвообразования. Однако глубина познания еще очень невелика. Главная причина этого — сложность почвенной системы, в которой одновременно совершается много различных микропроцессов различного характера и различного направления, методов для расчленения которых пока еще не разработано. Кроме того, интенсивность и сама природа микропроцессов, совершающихся в почве в ходе ее развития, изменяются.

Существенную помощь в преодолении этой трудности может оказать использование метода моделирования почвообразовательных процессов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЧВООБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Под моделированием почвенных процессов понимается искусственное экспериментальное воспроизведение различных явлений и процессов, совершающихся или таких,

которые предполагаются совершающимися в почвах, — в обстановке контролируемого эксперимента. Последний может быть как лабораторным, так и полевым и выполняться на почве как с нарушенным, так и с естественным сложением.

Само собой разумеется, что поскольку наша задача заключается в познании сущности тех процессов и явлений, которые совершаются в почвах, находящихся в природной обстановке, постольку полевым опытам всегда следует отдавать предпочтение перед лабораторными. Однако лабораторные опыты много имеют преимуществ перед полевыми. Эти преимущества заключаются в возможности создать однородную почвенную массу, исключив тем самым пространственное варьирование свойств и состава почв, строго регулировать температуру, влажность и создавать при необходимости стерильные условия или вводить в опыт лишь определенные виды микроорганизмов и т. д.

Все эти особенности лабораторных исследований значительно упрощают условия эксперимента, позволяют проводить его быстрее, «чище» и получать поэтому более точные результаты.

Но во многих этих преимуществах таятся и «подводные камни», заключающиеся в более или менее значительном отходе от природной обстановки. При моделировании, например, процесса фильтрации влаги в насыпных колонках, создается исключительно инфильтрационный тип передвижения влаги и полностью исключается инфлюкционный, т. е. движение по трещинам, которое в природных условиях нередко может преобладать, как это было недавно подтверждено Ф. Р. Зайдельманом (1970). В результате быстрое и легкое вымывание солей, которое осуществляется в насыпных колонках в лаборатории, совершенно не соответствует тому, что есть в природе, особенно при тяжелом механическом составе почвы, когда влага, просачивающаяся по межструктурным трещинам, слабо затрагивает соли, содержащиеся внутри структурных отдельностей.

Следовательно, необходимы тщательный и постоянный учет этих отличий и, как правило, проверка результатов моделирования почвенных процессов, полученных в лаборатории в опытах, поставленных на почвах, находящихся в природной обстановке или хотя бы на почвенных монолитах. Только после такой проверки можно быть уверенным в том, что закономерности, установленные на лабораторных моделях, действительны и для натуральных почв.

В природе процессы, совершающиеся в почве, почти всегда протекают под влиянием совокупности различных условий и

факторов, многие из которых к тому же сами более или менее быстро изменяются во времени.

Поэтому задача модельных опытов обычно заключается в изолированном изучении того или иного почвенного процесса или явления с целью установления закономерностей, управляющих его ходом, в зависимости от какого-либо фактора или совокупности немногих факторов. Ограничение опыта изучением влияния одного или немногих факторов при постоянстве других условий и факторов — один из наиболее характерных приемов моделирования.

Возьмем в качестве простейшего примера такой микропроцесс, как испарение влаги из почвы, лишенной растительности (чистый пар). Скорость испарения из почвы в этом случае при глубоких грунтовых водах зависит по меньшей мере от семи факторов: температуры воздуха, его влажности, температуры почвы и ее влажности, скорости ветра состояния поверхности почвы и сложения пахотного горизонта.

Нужно найти зависимость скорости испарения влаги из почвы от названных факторов.

Чтобы выявить эту зависимость, необходимо поставить соответствующий эксперимент, в котором шесть факторов будут оставаться постоянными, а седьмой — изменяться по заданной программе. Например, ведя опыт в аэродинамической трубе, через которую с постоянной скоростью пропускается воздух («ветер») с постоянной температурой и влажностью и изменяя по определенному плану влажность почвы при неизменном состоянии ее поверхности и плотности сложения, мы создадим модель, с помощью которой может быть найдена зависимость скорости испарения от влажности почвы при данном сочетании других факторов.

Постановку опыта можно изменить и, поддерживая постоянными скорость движения, температуру и влажность воздуха и задав некоторую начальную влажность почвы, далее следить за тем, как она будет изменяться в пределах всей толщи образца почвы, участвующего в опыте. В этом случае можно установить закономерность иссушения всей почвенной толщи при определенном сочетании метеорологических факторов. Если при этом почва будет увлажнена не чистой водой, а водой с какой-либо меткой, то, ведя наблюдения над влажностью почвы и передвижением этой метки в ее толще, можно установить при данных смоделированных метеорологических условиях, толщине почвенного образца и его состоянии, изменение глубины расположения испаряющей поверхности в связи с изменением скорости испарения. Меняя в том же опыте, скажем, влажность воздуха при постоянстве ее темпе-

ратуры и скорости потока и влажности почвы, можно найти зависимость скорости испарения от влажности воздуха и т. д.

Моделирование почвенных процессов может осуществляться на разных уровнях — микропроцессов, частных и общих макропроцессов. Наиболее эффективно с точки зрения познания сущности почвообразования моделирование микропроцессов. Это определяется тем, что большая сложность системы почвообразовательных микропроцессов, которая и представляет собой почвообразование в целом, исключает полностью или почти полностью возможность изучения отдельных микропроцессов в нерасчлененном почвенном теле. Отсюда вытекает необходимость распознавания и исследования отдельных изолированных микропроцессов как первой начальной стадии изучения любого элемента почвообразования. Такой подход и является моделированием микропроцессов, ибо при этом мы изучаем их изолированно от всего почвенного тела и от других микропроцессов.

Этот прием давно уже применяется в почвоведении. Как пример, открытие процесса нитрификации и выяснение его природы, процесс анаэробного разложения клетчатки, сопровождаемый выделением метана, открытие пептизирующего действия на почву обменного иона натрия как явления, лежащего в основе процесса осолонцевания почв и т. д.

Второй стадией моделирования может быть выделение влияния на установленный и исследованный микропроцесс других сопутствующих ему микропроцессов или изменения тех или иных условий. При этом в одних случаях эти дальнейшие задачи могут ставиться дедуктивно, исходя из сущности изучаемого микропроцесса, в других случаях их постановка может подоказываться наблюдениями в природе. Например, при исследовании в природной обстановке условий азотного питания древесных насаждений разных типов, можно обнаружить обратную корреляцию между величиной кислотности почвы или содержанием в ней битумов, с одной стороны, и интенсивностью нитрификации, с другой. Это может послужить основанием для постановки модельного опыта по изучению влияния обоих этих факторов на интенсивность нитрификации. Такой опыт особенно важен в том случае, если величины кислотности и содержания в почве битумов обнаружат хорошо выраженную корреляцию между собой. Модельный опыт с раздельным изучением влияния кислотности и содержания битумов позволит выяснить относительное значение каждого из этих двух факторов в отдельности, а также их сочетания в подавлении нитрификации.

Постепенно усложняя такие модельные опыты и вводя в

них отдельные факторы или сопутствующие микропроцессы один за другим в различных сочетаниях, можно разобраться сначала в изолированном, а затем и в совместном действии исследуемых факторов и условий. Такой подход облегчит понимание того, что происходит в естественной почве, но, конечно, не даст еще ответа на то, как интересующее нас явление протекает в природной обстановке.

Одна из важных особенностей почвы в природе, как это отмечает Т. В. Аристовская (1965), — ее регулярное самообновление, тесно связанное с ее проточностью. Проточность можно осуществить в модельных опытах, но она окажется не такой, как в естественной почве *in situ*, хотя бы потому, что в лабораторном опыте почва обычно высушенная, растертая и пропущенная через сито, а в природной обстановке почва структурная, в которой воздушный, водный и окислительно-восстановительный режимы внутри структурных отдельностей и в межструктурных промежутках могут различаться весьма значительно. Следовательно, одной из следующих стадий может оказаться необходимой постановка лабораторного опыта на монолитах почвы, с последующим разбором монолита и выяснением того, как интересующие нас процессы совершались внутри структурных отдельностей и в межструктурных промежутках. Этот прием будет весьма важным, например, при изучении процесса отмыывания почвы от солей.

Подобных примеров много. Из сказанного ясно, что моделирование почвенных микропроцессов, вероятно, должно всегда проходить через несколько постепенно усложняющихся стадий, вплоть до почвенного монолита в лаборатории, а затем и изолированного с боков монолита, остающегося связанным с грунтом или нижними слоями почвы в естественной обстановке.

Несомненно, разработка и установление стадий во всех случаях задача не простая, а во многих случаях пока еще и не разрешимая. Это зависит прежде всего от того, что мы часто не в состоянии бываем даже распознать те микропроцессы, которые подлежат моделированию, равным образом как и те сопутствующие микропроцессы, влияние которых на данный микропроцесс, например нитрификацию, следует установить.

Относительно проще и легче исследование тех микропроцессов, в которых живая фаза почв непосредственно не участвует. Таковы, например, многие физические явления, связанные с превращением в почве влаги. Однако и в этой области существует еще много неясных, до конца еще не понятых явлений. Они подлежат исследованию с помощью

моделирования. Например, процесс испарения влаги из почвы в атмосферу, который согласно исследованиям Б. В. Дерягина, С. В. Нерпина, Н. В. Чураева и других оказался состоящим из нескольких микропроцессов передвижения объемной, пленочной и парообразной влаги. Природа и количественные характеристики этих микропроцессов и само их существование могли быть изучены только путем моделирования — экспериментального и математического.

Говорить о явлениях и процессах, протекающих, казалось бы, без прямого участия живой фазы, надо весьма осторожно. Игнорирование участия живой фазы очень часто (пожалуй, в большинстве случаев) имеет под собой не столько твердо установленные факты, точно доказывающие отсутствие этого участия, сколько экспериментальные трудности, связанные с введением в опыт живой фазы и рутинную привычку не учитывать живое вещество почвы в своем мышлении, во имя упрощения явления, и заканчивать разработку той или иной задачи на стадии исследования мертвой, высушенной и растертой в ступке почвы.

Например, все явления и законы обмена катионами между твердой и жидкой фазами почв изучались и устанавливались, во-первых, на сухих растертых образцах почв, в которых «живая фаза» (точнее — бывшая живая) была представлена лишь трупами микроорганизмов и мелких беспозвоночных. Во-вторых, эти физико-химические явления исследовались с применением растворов такой концентрации (порядка 0,5—1 нормальной), которые в природе встречаются только в засоленных почвах.

Вполне понятно, что при описанной выше методике роль живой фазы в обменных реакциях учтена и не могла быть изучена. Между тем, совершенно несомненно, что в «живой почве» компоненты ее живой фазы, т. е. живые коллоидные системы — полностью или хотя бы частично — принимают участие в процессах ионного обмена. Размер этого участия, его особенности и закономерности нам совершенно неизвестны. Вполне возможно, что доля участия в явлениях обмена живой фазы, в особенности в нижних слоях почвы, бедных ею, действительно не так велика (как мы это молчаливо и предполагаем), как доля, обусловленная минеральной частью и в особенности глинистыми минералами. Но в почвах, богатых гумусом и живым веществом, особенно при легком гранулометрическом составе, роль живого вещества в процессах обмена может быть уже не столь малой. Кроме того, оно может вносить какие-то существенные качественные особенности в самый процесс обмена, в его закономерности, особенно при

тех реальных концентрациях почвенных растворов, характерных для незасоленных почв. О недопустимости игнорирования живого вещества при физико-химических исследованиях почв очень четко писал акад. В. И. Вернадский, слова которого приведены в эпиграфе.

Чтобы нас поняли правильно, поясним, что мы отнюдь не отрицаем допустимости и полезности проведения многих исследований и решения многих вопросов и традиционным методом — на сухих, растертых и просеянных образцах почв, которые, по сути дела, являются ничем иным, как тоже моделями почв природных. Но во многих случаях такие исследования должны допускаться лишь как первая стадия изучения того или иного явления, того или иного микропроцесса, того или иного свойства почвы. Дальнейшее исследование должно доводиться до почвы с ненарушенным сложением, содержащей в себе и живое вещество.

Уместно рассмотреть еще одно обстоятельство. Высушивая образец почвы, предназначенный для того или иного анализа, мы не только обезвоживаем и убиваем живую фазу, но обезвоживаем до состояния воздушной гигроскопичности всю массу изучаемого образца почвы, взятого часто из тех ее слоев, которые в природе постоянно, и при этом в течение, вероятно, столетий и даже тысячелетий находились во влажном состоянии. Таковы, вероятно, все грунты почв таежной зоны, кроме, быть может, например, некоторых песков древне-дюнного происхождения.

Моренные и покровные суглинки, флювиогляциальные отложения оставались влажными, вероятно, со времени своего отложения. Влажность в почвах таежной зоны сколько-нибудь существенно меняется лишь в пределах верхнего полуметрового слоя или немногим глубже, причем сильному иссушению (до ВЗ или даже МГ) мог подвергаться лишь верхний ее — до 20 см — слой.

Между тем обезвоживание образцов постоянно, можно сказать — вечно, влажного грунта может оказать какое-то, может быть, вполне ощутимое и даже существенное влияние на изучаемые свойства и связанные с ним микропроцессы. И это грубое искажение естественного состояния влажности исследуемой почвы остается пока не известным и не учтенным. На него необходимо обратить внимание. Автор на основании личного опыта может привести следующий пример. Образцы глеевых горизонтов почв из Лисинского лесничества Ленинградской области, образовавшихся из ленточных глин, будучи подвергнуты простому взбалтыванию с водой без предварительного высушивания, обладали несравненно более высокой

пептизируемостью, чем те же образцы при такой же обработке, но предварительно высушенные и растертые.

Моделирование может служить серьезным подспорьем и для исследования частных макропроцессов.

Пример такого моделирования — попытки ряда авторов (Веригина, 1953 и др.) в лабораторных условиях воспроизвести процесс оглеения почвенной минеральной массы. Попытки эти во многих случаях удались в том смысле, что было получено изменение цвета почвенной массы, которое характерно для глеевого процесса. Однако от понимания сущности глеевого процесса мы все же еще очень далеки.

Начаты полевые опыты по изучению процесса лессиважа, путем наблюдения над передвижением в почвенных монолитах суспензий с радиоактивными метками. Таковы исследования У. Керпена и Г. Шарпенсила (Kerpen, Scharpenseel, 1967), М. К. Мельниковой и С. В. Ковеня (1969) и др.

Очень содержательный доклад Л. Н. Александровой Т. В. Аристовской, И. С. Кауричева и В. В. Пономаревой (1970) о применении метода моделирования в почвоведении опубликован в I выпуске тезисов докладов IV делегатского съезда Всесоюзного общества почвоведов. В том же выпуске имеется еще ряд докладов по вопросам моделирования. Метод моделирования может применяться и к изучению общих почвообразовательных микропроцессов. В этой области должны быть упомянуты своеобразные «модели» в формах исторических памятников — различного рода земляных сооружений и насыпей. Таковы, например, изучение В. В. Докучаевым почв на стенах крепости в Старой Ладоге (Докучаев, Соч., т. III, 1949), изучение И. А. Крупенниковым (1967) почв Троянова вала и многие другие.

Правда, подобные исследования не безупречны, так как в них не всегда могут быть точно установлены состав и свойства исходной материнской породы, послужившей для образования новой почвы. Тем не менее, однако, они дают интересный материал для суждения о скорости развития почвообразования и его направления.

Наряду с этим своеобразные «модели» другого рода могут быть найдены в природе в виде разных геологических образований различного, более или менее точно датированного возраста. Таковы серии разновозрастных дюн, система разновозрастных террас и другие подобные объекты. Исследуя почвы на таких разновозрастных объектах, можно составить себе представление о скорости почвообразования и об особенностях различных его стадий, а отсюда и об общем ходе его развития. К таким исследованиям относятся работы О. Тамма

(Тамм, 1920), В. Т. Аальтонена (Aaltonen, 1935, 1939), Г. И. Чандлера (Chandler, 1942), Мичиганской опытной станции (A chronosequence of Podsol, 1963), Н. И. Горбунова, З. Прусинкевича и Б. П. Градусова (1963) и др.

Было бы весьма желательно организовать постановку специальных опытов по изучению почвообразования в различных зонах на особых участках, представляющих собой котлованы, заполненные прунтом, вынутым с достаточно большой глубины и тщательно перемешанным. Такие опыты следует организовать в Государственных заповедниках, где их охрана может быть осуществлена в наилучшей степени. Закладка таких опытов проектировалась и В. В. Докучаевым (Соч., т. VI, стр. 181, 1951).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего сказанного вытекает важнейшее следствие: основной ключ к познанию сущности «механизма» почвообразования — исследование природы лежащих в его основе микропроцессов. Все остальные проявления почвообразования, названные нами общими и частными почвообразовательными макропроцессами, представляют собой итоговые, суммарные многолетние результаты различных сочетаний большого количества разнообразных микропроцессов, взаимодействующих между собой.

До тех пор пока мы не поймем природу этих микропроцессов, не разберемся полностью в их внутреннем содержании, в их взаимном влиянии друг на друга, а также в зависимости их от внешних условий, т. е. от факторов почвообразования, — до тех пор не сможем утверждать, что постигли сущность частных и общих почвообразовательных макропроцессов, т. е. почвообразования в целом.

Нельзя не видеть в этом выводе близкой аналогии с положением, существующим в современной биологии, поразительные успехи в развитии которой явились следствием углубления исследования до молекулярного уровня.

В изучении почвообразовательных микропроцессов нельзя удовлетворяться молекулярным уровнем, надо углубляться до ионного уровня, поскольку именно на этом уровне совершаются такие важные явления, как обмен ионами между жидкой фазой и твердой фазой, распад первичных и вторичных минералов и синтез вторичных, состояние значительной части веществ, входящих в состав жидкой фазы, т. е. почвенного раствора, ионные стадии процесса полной минерализации органических остатков (до воды, углекислоты и простых солей зольных элементов) и т. д.

Это, однако, не исключает того, что многие микропроцессы должны изучаться и на молекулярном уровне — например, начальные и промежуточные стадии разложения органических

остатков, явления микробного синтеза и очень многие, если не все, явления жизни самих микроорганизмов, а равным образом и всех других организмов, т. е. все чисто биологические явления, протекающие в самих телах живых организмов, обитающих в почве.

Среди почвообразовательных микропроцессов самые важные в смысле развития хода почвообразования в целом — микробиологические процессы, связанные, в первую очередь, с биохимической деятельностью живых микробов. Это положение вытекает из того факта, что именно благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих остатки высших растений, в минеральную массу почвы вовлекаются различные чуждые ей и обладающие совершенно иной природой органические соединения. В их составе в форме химической энергии вовлекается в почвообразование и радиационная энергия — основной и почти единственный источник энергии для всех совершающихся на земной поверхности явлений.

Из этого вытекает важный вывод: главное направление в развитии генетического почвоведения, т. е. в области познания существа почвообразования в настоящее время, возможно, более широкое, глубокое и многостороннее развитие почвенных микробиологических исследований.

Это развитие должно, однако, идти в совершенно ином направлении, чем то, в котором почвенная микробиология развивалась до сего времени. М. М. Кононова (1963) и Т. В. Аристовская (1965) справедливо отметили, что микробиологическое изучение почв до сих пор заключалось по преимуществу в определении состава микрофлоры, а не в исследовании микробиологических процессов.

Дальнейшее развитие микробиологии должно заключаться не в бесконечном умножении числа работ о видовом составе почвенной микрофлоры (осуществляемых к тому же далеко не всегда совершенными методами), а в развитии исследований, которые могут быть названы микробиохимией. Их существо должно заключаться в изучении, с одной стороны, процессов метаболизма самих микроорганизмов, а с другой — реакций взаимодействия между продуктами этого метаболизма и минеральной частью твердой фазы почв.

Последние реакции особенно важны не только с точки зрения углубления в вопросы генезиса почв, но и с точки зрения познания источников и природы той стороны плодородия почвы, которая заключается в обеспечении растений питательными веществами. Это утверждение определяется тем, что указанные реакции являются первичными, освобождающими

питательные вещества из недоступных для высших растений форм их соединений.

В дальнейшем эти питательные вещества претерпевают многочисленные превращения под влиянием сосуществования процессов разложения остатков высших растений и отмерших микробов и микробного синтеза. В процессе существования названных явлений, относящихся к почвообразовательным микропроцессам, какая-то доля зольных питательных веществ и азота постепенно, но непрерывно, делается доступной для высших растений и усваивается ими.

Таким образом, указанными микропроцессами создаются те элементы плодородия почв, касающиеся режима питательных веществ, которые прямо связаны с генезисом почв.

Если обратимся к другой важнейшей стороне почвенного плодородия — обеспеченности растений влагой, то увидим, что и оно регулируется тоже микропроцессами, каковы, например, инфильтрация влаги в почву, ее испарение, ее удержание в почве, ее передвижение под влиянием гравитационных, сорбционных и осмотических сил. Источником энергии и здесь служат радиационная энергия, превращенная сначала в листовом аппарате растений в тепловую, а затем — в корневом аппарате растений в осмотическую и сорбционную. Она вызывает всасывание влаги в корни растений и одновременно десукцию влаги из почвы, что сопровождается увеличением поверхностной энергии твердых частиц почвы.

Таким образом, все важнейшие стороны плодородия почвы создаются и регулируются системой микропроцессов, которая вместе с тем составляет собой и основу почвообразования.

* *

*

В итоге всего сказанного можно сделать следующие выводы. Основная задача теоретического почвоведения — познание и анализ сущности почвообразования на всех стадиях его развития, начиная от зарождения почвы на свежей поверхности породы (массивной или рыхлой), через ее становление и до современной «жизни» почвы включительно.

Для решения этой задачи почвоведение располагает системой методов: сравнительно-географическим, сравнительно-аналитическим, стационарным и методом моделирования.

Сравнительно-аналитический метод значительно развился благодаря ассимиляции многочисленных новейших методов, заимствованных из других наук. Он дает весьма полную и глубокую характеристику состава и свойств почв, которая сама по себе обладает значительной ценностью — как научно-познавательной, так и практической, и может служить для

решения некоторых частных вопросов теоретического почвоведения и многих практических задач.

Однако этот метод и тем более сравнительно-географический не могут решить однозначно сформулированную выше задачу. Даже с учетом всех факторов и условий почвообразования, с одной стороны, и закономерностей, заимствуемых из соответствующих разделов физики, химии и биологии, с другой, сравнительно-аналитический метод не дает однозначного ответа на вопрос о сущности почвообразования, позволяя лишь строить гипотезы об этой сущности на уровне общих и частных макропроцессов. И хотя при выработке этих гипотез и учитываются известные уже данные о почвообразовательных микропроцессах и результаты немногочисленных модельных опытов, однако в то же время в основе этих гипотез остаются еще очень много допущений и предположений, что лишает их однозначности.

Стремление превратить эти гипотезы в теорию и анализ наших представлений о сущности почвообразования приводят нас к выводу о том, что в основе общего почвообразовательного макропроцесса лежит сложная система многочисленных микропроцессов и что, следовательно, познание сущности процесса почвообразования должно основываться на изучении этой системы, для чего требуется приложение стационарного метода исследования почв.

В этой области почвоведение добилось заметных успехов: разработаны основы теории водного, теплового и солевого режимов почв и учения об обмене зольными элементами и азотом в системе почва — высшая растительность. Значительные успехи достигнуты также в области теории обменных процессов в системе твердая фаза почвы (преимущественно коллоидальная ее часть) — почвенный раствор.

Названные теории разработаны, весьма важно, на количественной основе, которая позволяет применять балансовый метод и математический расчет, что приближает нас к прогнозированию соответствующих явлений.

Однако все эти явления относятся по преимуществу к явлениям физическим и отчасти физико-химическим, протекающим без участия химических превращений веществ. В этой же последней области сделано пока еще очень немного. Нам известна природа очень немногих химических (в широком смысле этого слова) явлений, относящихся к почвообразованию в целом. Непосредственное изучение стационарными методами микропроцессов превращения веществ, протекающих в почве, чрезвычайно затруднено. Такое явление объясняется тем, что почвообразование представляет собой очень

сложную систему многочисленных микропроцессов различной природы, находящихся в тесном взаимодействии. Очень важно при этом то, что большинство микропроцессов связано с деятельностью микроорганизмов и имеет микробиохимическую природу. И здесь препятствием на пути раскрытия существа почвообразования встает не только сложность и многочисленность указанных микропроцессов, но и весьма слабая изученность биохимической стороны жизнедеятельности самой живой фазы комплекса микроорганизмов и почвенных беспозвоночных. В силу этого прямое изучение в природе стационарными методами в нерасчлененной почве всей системы микропроцессов представляется в настоящее время неосуществимым. Возможно изучение только отдельных микропроцессов или их немногочисленных комбинаций. Такое изучение в большинстве случаев может быть лишь полуколичественным — в том смысле, что мы вынуждены ограничиваться в большинстве случаев лишь режимами содержания тех или иных веществ, будучи лишены возможности нахождения их полных балансов.

Из сказанного вытекают три следствия. Во-первых, в дальнейшем развитии почвоведения необходимо значительно усилить применение стационарных исследований, поскольку они являются главным методом изучения почвообразовательных микропроцессов. Во-вторых, особое внимание должно быть уделено изучению деятельности живой фазы почвы, т. е. явлениям микробиохимическим, поскольку именно через них в процесс почвообразования вовлекаются органические соединения из опада наземных растений и связанная в них радиационная энергия, трансформированная в химическую зелеными растениями в процессе фотосинтеза.

Объектом изучения микробиохимических явлений должна, вообще говоря, стать нерасчлененная почва, находящаяся в природных условиях. Однако прямое достижение этой цели, принимая во внимание указанные выше трудности, очень часто невыполнимо. Отсюда вытекает третье следствие — необходимость широкого развития метода моделирования, который уже неоднократно с успехом использовался в почвоведении для разработки ряда частных, но очень важных вопросов.

Моделирование должно начинаться с изучения отдельных изолированных микропроцессов в лабораторных условиях, а затем переходить, с одной стороны, к постепенному внутреннему усложнению, путем охвата систем из нескольких микропроцессов, а с другой стороны — к постепенному усложнению и изменению внешних условий, в которых протекают эти мик-

ропроцессы. Следующий этап должен заключаться в перенесении этих исследований на модели, более близкие к природным условиям (почвенные монолиты в лаборатории) и, наконец, в естественные почвы.

Следует считать, что моделирование микропроцессов должно сделаться, наряду со стационарными исследованиями, одним из самых основных методов изучения сущности почвообразования, а вместе с тем и сущности плодородия почв, поскольку плодородие является следствием процесса почвообразования.

В заключение подчеркнем, что изучая почвообразовательные процессы различных уровней, применяя различные методы исследования, мы ни на одну минуту не должны забывать о том, что главным и единственным объектом наших исследований является почва в целом и протекающий в ней процесс почвообразования в его историческом развитии.

РЕЗЮМЕ

Почва — особое природное тело, биокосное по своей природе — состоит из четырех фаз: твердой, жидкой, газообразной и живой. Живая фаза представлена микроорганизмами, мелкими беспозвоночными и некоторыми позвоночными животными, постоянно обитающими в почве. Корни растений в состав живой фазы не входят.

Почва представляет собой открытую систему. Между ней, с одной стороны, и другими природными телами — атмосферой, грунтом и наземными растениями и животными, с другой — происходит обмен веществами и энергией. Почва получает радиационную энергию от Солнца, часть которой излучается в космическое пространство, другая часть превращается в тепловую энергию и расходуется на нагревание почвы и атмосферы и испарение влаги (физическое и транспирационное). В ходе испарения часть тепловой энергии превращается в поверхностную энергию твердой фазы. Часть радиационной энергии улавливается зелеными растениями и превращается в химическую энергию органических соединений, синтезируемых этими растениями. Эта доля радиационной энергии поступает в почву в составе растительного опада. Живое вещество почвы (ее живая фаза), разлагая растительные остатки, вовлекает эту долю радиационной энергии в процесс почвообразования.

В составе растительного опада на поверхность почвы поступает также поток зольных элементов и азота, извлеченных из почвы высшими растениями. Состав потока определяется избирательной способностью растений.

Радиационная энергия, поступившая в почву, в форме тепловой и в особенности химической, вызывает большое число различных простейших физических, химических и биологических явлений. Из них, во-первых, складывается разложение органических соединений, входящих в состав растительного

опада и отмерших компонентов живой фазы, во-вторых — микробный синтез новых органических соединений, которые затем тоже подвергаются разложению; в-третьих — разложение первичных и вторичных минералов, входящих в состав твердой фазы, и растворение некоторых продуктов этого разложения; в-четвертых — синтез вторичных минералов; в-пятых — передвижение в толще почвы, преимущественно с жидкой фазой различных веществ в форме ионных, молекулярных, коллоидных растворов и суспензий (в передвижении участвуют сила тяжести, а также капиллярные, сорбционные и осмотические силы, приводимые в действие радиационной энергией).

Указанные простейшие процессы и явления, происходящие в почве, которые могут быть названы почвообразовательными микропроцессами, являются основой почвообразования в целом. Они обладают цикличностью, сопряженной с тройным ритмом — суточным, годовым и многолетним — поступления на поверхность почвы радиационной энергии и с биологическим ритмом жизни растений.

Цикличность почвообразовательных микропроцессов обусловлена тем, что среди них имеется много микропроцессов, противоположных по своему направлению, стремящихся к взаимной компенсации, что создает тенденцию к обратимости почвообразовательного процесса в целом. Однако полной обратимости не достигается, и по окончании годового цикла в почве возникает остаточное изменение в ее составе и свойствах, преимущественно в твердой фазе. Это изменение настолько мало, что не может быть, как правило, установлено прямыми наблюдениями. Но накопление этих изменений за десятки и сотни лет существенно отражается на составе и свойствах твердой фазы, что мы и воспринимаем как прогрессивно развивающийся почвообразовательный процесс определенного типа. Такой процесс может быть назван общим почвообразовательным макропроцессом, например — черноземообразовательный, буроземообразовательный и т. д.

Толща материнской породы, превращающейся в почву в ходе общего почвообразовательного макропроцесса, расчленяется на несколько связанных в своем происхождении и отличающихся по составу и свойствам генетических горизонтов, система которых образует профиль почвы. Отличия свидетельствуют о том, что в образовании разных горизонтов принимают участие различные совокупности микропроцессов. Они могут быть названы частными почвообразовательными макропроцессами. Примерами их являются накоп-

ление гумуса, образование лесной подстилки, оподзоливание, лессиваж, оглинивание, иллювиирование гумуса или глины, или полуторных окислов, оглеение и т. д.

Основная задача теоретического почвоведения, помимо объективной всесторонней характеристики состава и свойств почв основанное на этой характеристике познание сущности почвообразования, начиная с момента зарождения почвы, в ходе ее становления и развития, и кончая современной текущей «жизнью» почвы, т. е. совокупностью продолжающихся микропроцессов.

Изучение почвообразования ранее, когда почвоведение еще не располагало таким богатым арсеналом методов исследования, как сейчас, основывалось главным образом на применении сравнительно-географического метода. Он заключался в сопряженном изучении почв и факторов почвообразования. Корреляционные зависимости, устанавливаемые в результате такого изучения между составом и свойствами почв, с одной стороны, и факторами почвообразования — с другой, с привлечением общих закономерностей из области физики, химии и биологии, и ложились в основу создаваемых гипотез о сущности почвообразования.

Широкое внедрение в почвоведение разнообразных новейших методов физики, химии, минералогии, биологии и т. д. способствовало развитию в почвоведении сравнительно-аналитического метода. Последний заключается в том, что суждение о природе частных и общих почвообразовательных макропроцессов выносится на основании сравнения состава и свойств почвенных горизонтов с составом и свойствами материнской породы. Однако и этот метод позволяет строить лишь более точные и обоснованные гипотезы о сущности почвообразовательных макропроцессов — общих и частных. Последние же слагаются из микропроцессов, к изучению которых сравнительно-аналитический метод не приложим. Из этого вытекает необходимость нахождения путей изучения микропроцессов, что и привело к разработке стационарного метода исследования почв.

Задача этого метода — прямое изучение микропроцессов в природной обстановке. В результате развития стационарных исследований разработаны основы теории водного, теплового и солевого режимов почв и их балансов, учение об обмене зольными веществами и азотом в системе почва — высшая растительность, накопление значительного материала о составе почвенных растворов, почвенного воздуха, о биохимических явлениях в почве и т. д.

Дальнейшая теория почвообразования встречает значительные затруднения. Таковы, во-первых, большая сложность системы микропроцессов, лежащих в основе почвообразования. Во-вторых, среди этих процессов ведущее положение занимают микробиохимические явления, связанные с жизнедеятельностью почвенной микрофлоры и микрофауны, очень слабо изученные. Поэтому познание названной системы микропроцессов, в которых и заключается почвообразование, оказывается в настоящее время осуществимым лишь в недостаточной степени.

Значительную помощь в анализе сложной системы микропроцессов, лежащих в основе почвообразования, может оказать метод моделирования. Последний уже дал плодотворные результаты в области установления закономерностей обмена в системе твердая фаза почвы — почвенный раствор, в области влияния состава обменных катионов на свойства почвы, в области изучения некоторых микробиохимических явлений (например, нитрификация и т. д.). Представляется весьма целесообразным дальнейшее широкое внедрение этого метода для изучения отдельных микропроцессов различной природы, а затем — постепенно усложняющихся систем из этих процессов.

Самым важным направлением в дальнейшем развитии теоретического почвоведения с учетом сформулированной выше основной его задачи, является развитие микробиологических и микробиохимических исследований, так как именно через микробиохимические процессы и явления в почвообразование вовлекается радиационная энергия, преобразованная в химическую, которая является основным и даже единственным двигателем почвообразования. Одновременно должны расширяться и стационарные исследования, позволяющие изучать микробиохимические явления (наряду с явлениями и иной природы) непосредственно в «живых» почвах.

Система целесообразно сочетаемых методов: сравнительно-географического, сравнительно-аналитического, стационарного и метода моделирования и позволяет решить основную задачу почвоведения — раскрыть сущность почвообразования, т. е. генезиса почвы.

Плодородие почвы есть одно из проявлений ее генезиса. Поэтому указанный путь исследования позволит одновременно разобраться и в природе плодородия почвы и усовершенствовать старые и найти новые пути управления им.

SUMMARY

The soil is a specific natural body formed by both mineral components and living matter. The soil consists of four phases: solid, liquid, gaseous and living. The latter includes micro-organisms, tiny invertebrates and some vertebrate animals living in the soil. The plant roots are not considered to be a part of the soil living phase.

The soil is an open system, as an exchange of matter and energy proceeds permanently between the soil and other natural bodies — atmosphere, parent rock and higher plants. The soil receives solar radiant energy. A part of this energy is lost on the radiation into outer space, the other part being transformed into heat and lost on soil heating and vaporization of soil moisture (through physical evaporation and transpiration). In the course of evapotranspiration a part of the heat transfers into the surface energy of the soil solid phase. A part of the solar radiation is adsorbed by higher plants and transformed into chemical energy of organic compounds synthesized by these plants. In the course of plant residues decomposition, the living phase of the soil involves this part of the solar radiation in the process of soil formation.

Considerable quantities of mineral elements and nitrogen, adsorbed by plants from the soil, are added to the soil surface each year through plant residues, their composition being controlled by selective uptake of nutrients by higher plants.

The solar radiation, supplied to the soil as heat and chemical energy, gives rise to a number of elementary physical, chemical and biological phenomena. These elementary phenomena are responsible for decay of organic compounds added to the soil with residues of higher plants; for microbial synthesis of organic substances; for decomposition of these newly formed substances; for weathering of primary and secondary minerals; for synthesis of clays; for translocation of all these substances within the solum as ionic, colloid, molecular solutions and sus-

pensions. In this translocation the gravity and a number of forces supplied with energy by the solar radiation (capillary, sorptive, osmotic forces) are operative.

The elementary processes and phenomena proceeding in the soil might be referred to as soilforming microprocesses. They make up the basis of soil formation. These microprocesses are cyclic in nature and subjected to periodicity, according to daily, seasonal and long-period fluctuations in solar radiant energy supply and to biological rhythm of plant activity. An action of a series of contrarily directed soil forming microprocesses results in cyclic character of these processes and in their tendency to reversibility. The complete reversibility could not however be attained and at the end of each annual cycle in the soil appear some residual changes, which are usually too small to be detected by direct observations. The accumulation of these changes for centuries is believed to be the progressively developing soil-forming process, causing distinct changes in the composition of the solid soil phase. Such a process is referred to as the general soil-forming macroprocess, e. g. chernozem-formation, formation of brown forest soil etc.

Development of the soil-forming macroprocess in the parent rock results in the formation of some individual horizons different in composition and properties. These horizons are collectively referred to as the soil profile. From the differences between horizons one might infer that different series of microprocesses are responsible for the formation of various soil horizons. These series of microprocesses are called partial soil-forming macroprocesses e. g. accumulation of humus, formation of forest litter, podzolization, clay formation, illuviation of humus, clay particles and sesquioxides, gleization etc.

The main objective of the theoretical soil science, besides comprehensive investigations of composition and properties of soils, is the study of the essence of soil formation including soil origination, development and contemporary life (i. e. the combination of continuing microprocesses).

Formerly when soil science had at its disposal not so many methods of researches as nowadays, the study of soil formation was based mainly on the application of the comparatively-geographical method. The hypotheses concerning the essence of soil formation were substantiated mainly by the correlation found between the composition and properties of soils and factors of soil formation, the general laws of physics, chemistry and biology being taken into account.

Employment of various modern methods of physics, chemistry, mineralogy, biology and other sciences in soil science pro-

notes the development of comparatively-analytical method. By this method it is possible to obtain information on the nature of partial and general soil-forming macroprocesses from the comparison of composition and properties of individual soil horizons with those of parent rock. This method however allows only to introduce more correct hypotheses on the essence of general and partial macroprocesses, which consist of a number of microprocesses. As the latter cannot be studied by the comparatively-analytical method, the new-stationary method of soil researches has been worked out for investigation of microprocesses. The main objective of this method is the direct study of microprocesses under natural conditions.

The development of stationary investigation made it possible to elaborate the theory of moisture-, heat- and salts-regimes and balances of these components in soils; to promote the development of the conception of mineral elements exchange between soils and higher plants; to obtain the information on the composition of soil solution, soil air, biochemical phenomena in soil etc.

Further development of the theory of soil formation encounter significant difficulties. At first the system of microprocesses, which forms the basis of soil formation, is very complicated; secondly only a few data is available on controlled by the activity of microorganisms microbiological phenomena, which are of prime importance in the soil formation. That is why the study of the system of microprocesses which make up the soil formation appears to be inadequate.

The method of modelling seems to be very useful in the investigation of the complicative system of microprocesses making the basis of soil formation. Application of this method was found to be very useful in the study of exchange in the system solid phase - soil solution, in the examination of the influence of the exchangeable cations on soil properties, in the investigation of some microbiological phenomena (e. g. nitrification) etc. Wide employment of this method in the investigation of various individual microprocesses and their combination appears to be reasonable.

Taking into consideration the main objective of soil science which has already been cited, the most important trend in the development of theoretical soil science is thought to be the development of investigations in microbiological and microbiological processes, as through these very processes and phenomena the solar radiation, transformed into the chemical energy, is involved into soil formation. At the same time the stationary investigations should be widely used, as they give information

on biochemical phenomena (as well as other phenomena) directly in the «living» soil.

Employment of comparatively-geographical, comparatively-analytical, stationary and modelling methods adequately combined, makes it possible to solve the main problem of soil science — to find out the essence of soil formation, that is the soil genesis.

As the soil productivity is greatly effected by its genesis, the system of methods cited allows to study the nature of the soil productivity and to work out the measures for its increase.

ЛИТЕРАТУРА

- Абатуров Б. Д., Девятых В. А., Зубкова Л. В., 1969 г. Роль роющей деятельности сусликов в размещении минеральных веществ в полупустынных почвах Заволжья. «Почвоведение», № 12.
- Александрова Л. Н., Аристовская Т. В., Кауричев И. С., Пономарева В. В. Моделирование почвенных процессов. Тез. докл. IV делег. съезда Всесоюзн. О-ва Почвоведов, вып. 1. Алма-Ата, 1970.
- Айдинян Р. Х., 1960 г. Извлечение ила из почвы. Изд. Гипроводхоза.
- Арипушкина Е. В., Дмитриев Е. А., Миненкова Е. В., 1968. Точность методов валового анализа минеральной части почв. Почвоведение, № 10.
- Аристовская Т. В., 1965. Микробиология подзолистых почв, М.-Л., «Наука».
- Аристовская Т. В., Кутузова Р. С., 1968. О микробиологических факторах мобилизации кремния из труднорастворимых природных соединений. Почвоведение, № 12.
- Аристовская Т. В., Дараган А. Ю., Парипкина О. М., 1967. Изучение микробных пейзажей почвы как средство познания почвенных процессов. Микробиология, 36, № 2.
- Арманд Д. Д., 1947. Основы методов балансов в физической географии. Изв. Всесоюзн. Геогр. об-ва, 79, № 6.
- Афанасьева Н. Н., Панфилов В. П., 1969. О корреляции между механическим составом, наименьшей влагемкостью и максимальной гигроскопичностью. Почвоведение, № 2.
- Бондарева В. Я., 1971. Об опыте применения тяжелой воды при изучении поведения влаги в растениях, глинистых минералах и почвах в советских и зарубежных исследованиях. Почвоведение, № 2.
- Важенин И. Г., Долгополова Р. В., Сметкова А. П., 1969. Микроестрота признаков и свойств почв в пределах почвенного разреза. Почвоведение, № 4.
- Васильев И. С., Роде А. А., 1960. Опыт мечения почвенной влаги поном хлора с целью изучения законов ее передвижения в полевых условиях. Почвоведение, № 4.
- Веригина К. В., 1953. К характеристике процесса оглесения почв. Тр. ИП АН СССР, 41.
- Вернадский В. И., 1939. Проблемы биогеохимии, вып. II. О коренном материально-энергетическом отличии живых и косных естественных тел биосферы. М.-Л., Изд-во АН СССР.
- Волобуев В. Р., 1953. Почвы и климат. Баку, Изд-во АН АзССР.
- Волобуев В. Р., Кулешов Л. Н., 1970. Содержание гидратной воды в почвах разных генетических типов (Сб. «Закономерности простран-

- ственного варьирования почв и информ.-статистич. методы его изучения». М., «Наука».
- Волобуев В. Р., 1961. Компонентная вода географической оболочки. Почвоведение, № 11.
- Гедройц К. К., 1909. Методы химического анализа почв, применяемые в сельскохозяйственной химической лаборатории. Тр. с.-х. хим. лаб., вып. 7.
- Гедройц К. К., 1923. Химический анализ почв. Изд. 1-ое. «Новая деревня». Л., 1929. Изд. 2-е; — 1932. Изд. 3-е; — 1935, Изд. 4-е; — Изд. 5-е, 1960.
- Гедройц К. К., 1955. К вопросу о почвенной структуре и сельскохозяйственном ее значении. Избр. соч., т. I. М., Сельхозгиз.
- Герасимов И. П., 1966. Что такое субтропические подзолы Абхазии? Почвоведение, № 11.
- Герасимов И. П., Глазовская М. А., 1960. Основы почвоведения и географии почв. М., Географгиз.
- Горбунов Н. И., 1961. Методы определения несиликатных аморфных и кристаллических полуторных окислов в почвах и глинах. Почвоведение, № 11.
- Горбунов Н. И., 1963. Высокодисперсные минералы и методы их изучения. М., Изд-во АН СССР.
- Горбунов Н. И., Прусинкевич З., Градусов Б. П., 1963. Образование глинистых минералов на песчаных породах разного возраста. Почвоведение, № 1.
- Дмитриев Е. А., 1966. Об определении необходимой повторности в экспериментальной работе почвоведов. (Вестник МГУ, сер. VI, № 4).
- Дмитриев Е. А., 1967. О математических методах в почвоведении. Научн. докл. Высшей школы, биол. науки, № 11.
- Дмитриев Е. А., 1970. Об использовании дисперсионного анализа при изучении пространственной variability свойств почв. (Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ.-стат. методы их изучения». М., «Наука».
- Дмитриев Е. А., 1970б. О статистическом расчленении неоднородной совокупности на подсовкупности. (Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ.-стат. методы их изучения»). М., «Наука».
- Дмитриев Е. А., 1970в. Об оценке достаточного объема выборочных наблюдений. (Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ. стат. методы его изучения»). М., «Наука».
- Дмитриев Е. А., Манучаров А. С., 1968. К объяснению причин ассиметрии в рамке делений водопроницаемостей. Почвоведение, № 7.
- Докучаев В. В., 1949. Русский чернозем. Соч., т. III. М., Изд-во АН СССР.
- Докучаев В. В., 1951. Предварительный отчет об исследованиях на Кавказе летом 1899 г. Соч., т. VI, М., Изд-во АН СССР.
- Докучаев В. В., 1951. Программа исследований на участках девственной степи Деркульского конного завода. Соч., т. VI. М., Изд-во АН СССР.
- Докучаев В. В., 1953. Объяснительная записка к проекту Почвенного Комитета. Соч., т. VII, М., Изд-во АН СССР.
- Зейдельман Ф. Р., 1957. Методика исследования некоторых физических и водно-физических свойств каменистых почв. Почвоведение, № 1.
- Зейдельман Ф. Р., 1968. Водный режим тяжелых оглеенных и неоглеенных дерново-подзолистых почв. Почвоведение, № 8.

- Зейдельман Ф. Р., 1970. Диагностика, общность и различия подзолистых и лессивированных подзолов, псевдоподзолов и псевдоглеев. Почвоведение, № 12.
- Захаров С. А., 1927. Почвоведение. М., Сельхозгиз.
- Иванушкин К. Б., Карпачевский Л. О., 1969. Изменчивость содержания и состава гумуса дерновоподзолистых почв в пределах биогеоценоза. Почвоведение, № 2.
- Измаильский А. А., 1949. Влажность почвы и грунтовые воды. — Избр. соч. М., Сельхозгиз.
- Карпачевский Л. О., Киселева Н. К., Попова С. И., 1968. Пестрота почвенного покрова под широколиственно-еловым лесом. Почвоведение, № 1.
- Кауричев И. С., Ноздрунова Е. М., 1960. Учет миграции некоторых соединений в почве с помощью хроматографических колонок. Почвоведение, № 12.
- Кауричев И. С., Ноздрунова Е. М., 1963. О содержании низкомолекулярных кислот в составе воднорастворимых органических веществ почв. Почвоведение, № 3.
- Козловский Ф. И., 1970. Почвенный индивидуум и методы его определения. (Сб. «Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информ.-стат. методы его изучения», М., «Наука».
- Кононова М. М., 1963. Органическое вещество почв. М., Изд-во АН СССР.
- Крупенников И. А., 1967. Черноземы Молдавии. Кишинев.
- Медведев В. В., 1966. Математическая обработка результатов определения водно-физических свойств почв степной части Украины. Почвоведение, № 8.
- Мельникова М. К., Ковеня С. В., 1969. К методике моделирования процессов перемещения дисперсных частиц в пористых средах. Почвоведение, № 13.
- Неуструев С. С., 1930. Элементы географии почв. Л., Сельхозгиз.
- Полынов Б. Б., 1933. Новая эпоха в развитии учения о почве. — Природа, № 1.
- Прасолов Л. И., 1939. О методах и направлениях почвоведения. — Пробл. совр. почвов., № 8.
- Пузаченко Ю. Г., Карпачевский Л. О., Взуздаев Н. А., 1970. Возможность применения информационно-логического анализа при изучении почв. Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ.-стат. методы их изучения», М., «Наука».
- Рашевская И. М., 1954. К вопросу о методах определения суммы сульфатов в почве и об обволакивании гипса карбонатами. Почвоведение, № 9.
- Роде А. А., Седлецкий И. Д., 1939. Песчаные почвы террас р. Камы. Тр. ИП, т. XIX, в. 2, АН СССР, Л.
- Роде А. А., 1934. К вопросу о степени подзолистости. Тр. ИП, АН СССР, XIII.
- Роде А. А., 1963. Почвенные режимы — задачи и общие методы их изучения. — Почвоведение, № 6.
- Роде А. А., Рашевская И. М., 1968. Еще раз к вопросу об оподзоливании и лессиваже. Сб. «Лес и почва», Красноярск.
- Рыбалкина А. В., Кононенко Е. В., 1957. Активная микрофлора почв. Сб. «Микрофлора почв Европейской части СССР». М., Изд-во АН СССР.
- Соколов И. А., Таргульян В. О., 1970. Статистический подход к анализу почвенного покрова. Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ.-стат. методы их изучения», М. «Наука».

- Судницын И. И., 1958. Влияние физических свойств почвенной влаги на интенсивность поглощения ее древесными породами. — Почвоведение, № 11.
- Судницын И. И., 1966. Новый метод оценки водно-физических свойств почв и влагообеспеченности леса. М., «Наука».
- Судницын И. И., 1970. Количественная модель передвижения воды в системе почва—растение—атмосфера. Почвоведение, № 11.
- Тюрин И. В., 1931. Новое видоизменение объемного метода определения гумуса с помощью хромовой кислоты. — Почвоведение, № 5-6.
- Фридланд В. М., 1970. Элементарные почвенные ареалы как исходные единицы почвенно-географической таксономии. Сб. «Закономерности пространственного варьирования почв и информ.-стат. методы их изучения», М., «Наука».
- Ходашева К. С., Денисман Л. Г., 1961. Роль малых сусликов в формировании комплексного почвенного покрова в глинистой полупустыне Заволжья. — Почвоведение, № 1.
- Шилова Е. И., Коровкина Л. В., 1961. Динамика поступления и качественный состав лизиметрических вод песчаных поверхностно-подзолистых почв. Вестник ЛГУ, серия геол. и геогр., № 6.
- Штрелейн М., 1969. Сухое сжигание. Методич. рук-во по изучению почвенной структуры. Л., «Колос».
- Aaltonen V. T., 1935, 1939. Zur Stratigraphie des Podsolpro-fils. 1, 11. Communicationes Instituti forestalis Fenniae, 20, № 6; 27, № 4. Helsinki.
- A Chronosequence of Podsoles in Northern Michigan. — Michig. Agr. Exp. St. Quart. Bull., 1963, 46, № 1.
- Bear F. E., 1964. Chemistry of the soil. Reinhold Publ. Cop. N. Y.
- Brewer R., 1964. Fabric and minerals analysis of soils. N. Y.
- Chandler R. G., 1942. The time required for podsol profile formation as evidenced by the Mendenhall glacial deposits near Juneau, Alaska, S. S. S. Amer. Proc., 7.
- Deh B. C., 1950. The estimation of free iron oxide in soils and clays and their removal. — J. of Soil Sci., 1.
- Drosdoff M., 1935. The separation and identification of the mineral constituents of colloidal clays. — Soil Sci., 30, № 6.
- Henin S., Aubert G., 1945. Relations entre le drainage la temperature et l'évolution des sols. — C. R. Ac. Sc., 220.
- Jeffries C. B., 1946. A rapid method for the removal of free iron oxides in soils prior to petrographic analysis. — Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 11.
- Kerpen W., Scharpenseel H. W. 1967. Movement of ions and colloids in undisturbed soil and parent rock material columns Symp. «Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies», Vienna.
- Kubiena W. L., 1938. Micropedology. Ames, Iowa, USA.
- Kundler P., 1959. Zur Methodik der Bilanzierung der Ergebnisse von Bodenbildungsprozessen dargestellt am

- Beispiel eines Texturprofils von Geschiebemergel in Nord Deutschland. — Z. f. Pflanzen, Dung., Bodenkunde, 86, H. 3.
- L a n g R., 1915. Versuch einer exakten Bodenklassifikation in klimatischen und geographischen Hinsicht. — Int. Mitt. f. Bodenkunde, H. 4.
- M a r t o n n e E., 1926. Areisme et indice d'aridité. — C. R. Ac. Sc., 182.
- M e h r a O. P., J a c k s o n M. L., 1959. Specific surface determination by duointerlayer and mono-interlayer glycerol sorption. — Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23.
- R a t h e r I. B., 1917. Determination of organic matter in soils. Arc. Exp. St. Bull., N 140.
- T a m m O., 1920. Markstudies i det nordsvenska barrskogsområdet Medd. fr. St. Skogsförs. Anst. H. 17, Stockh.
- T a m m O., 1922. Om bestämning av de organiska komponenterna i markens gelkomplex. Medd. fr. St. Skogsförs. Anst. H. 19, N 4.
- T o e n t h w a i t e C. W., 1931. The climates of North America. — Geogr. Rev., XXI.
-