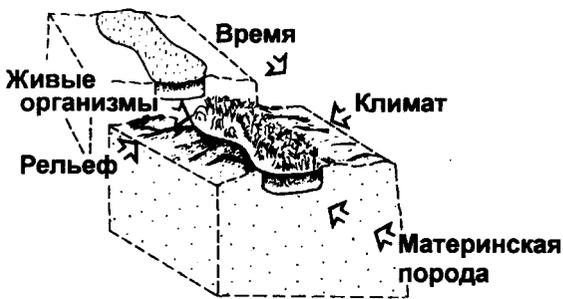


## Глава 2

# ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ПОЧВОВЕДЕНИЕ: НАУКА О РАЗВИТИИ ПОЧВЫ

### Что изучает генетическое почвоведение (педология)

Термин "*педология*" (*pedology*) образован от слова "*педология*", которое само произошло от греческих слов "педос" (почва) и "логос" (слово), т.е. исходно педология означала суждение о почве. В современном понимании, педология - раздел почвоведения, изучающий почвообразование, морфологию и классификацию почв как природных тел и как компонентов ландшафта. Педология, прежде всего - комплексная наука, стремящаяся объяснить процессы формирования реальных наблюдаемых свойств почвы, а также выявить пространственные закономерности распространения почв мира (строения *педосферы*) в связи с развитием форм рельефа, биогеохимическими циклами, условиями существования живых организмов. Почвоведы-педологи изучают как механизмы, так и масштабы пространственной и временной изменчивости свойств почв, начиная от уровня микроскопических наблюдений до глобального, и от сезонов года до геологических периодов. Они стремятся установить закономерные и случайные причины изменчивости



**ПОЧВООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ**

почв для того, чтобы оценить корректность экстраполяции конкретных данных для каждого уровня исследования (разрешения). Педология рассматривает почву как природный феномен безотносительно к практическим, (инженерным или сельскохозяйственным) задачам ее использования, как пористый материал на земной поверхности. Однако фундаментальное понимание почвы, получаемое от таких неприкладных исследований, оказывается основой для решения многих прикладных проблем сельского хозяйства, коммерции, управления природными ресурсами.

Уникальные свойства почвы на ландшафтном уровне формируются при тесном взаимодействии биоты, климата, рельефа, геологических и временных факторов. В свою очередь, на микроскопическом уровне (от микрометров до сантиметров) "архитектура" почвы определяется соотношениями между поровым пространством, картиной распределения неорганических и органических компонентов, структурой агрегатов (гетерогенных масс, состоящих из связанных между собой компонентов частиц почвы). "Микро-архитектура" оказывает заметное влияние на миграцию и аккумуляцию влаги и химических соединений, распад и синтез минералов, ризосферу, локализацию очагов микробиологической активности. Разработка единой комплексной системы представлений о почве на разных уровнях ее организации: от отдельных образцов до педосферы в целом, является приоритетом фундаментальных исследований почвоведов, и основная роль в ней принадлежит генетическому почвоведению, т.е. педологии. Именно почвоведом-генетикам, знающим причины и масштабы вариабельности почв и имеющим в качестве одного из своих рабочих методов комплексный иерархический подход, принадлежит главная роль в создании информационной базы по почвам Земли. Одно из направлений фундаментальных почвенных исследований - реконструкция природной среды прошлого, использует информацию о настоящем. Сейчас начинает развиваться еще более удивительное направление - вземное (инопланетное) почвоведение.

## Почвы в природных системах Земли

Мы уже говорили о том, что почвы являются частью ландшафтной оболочки Земли и ландшафта и изменяются в пространстве и во времени. Изменчивость почв не всегда может быть достаточно хорошо объяснена, тем не менее, она обычно интерпретируется как результат взаимосвязанных изменений климатического, геологического, биологического и топографического факторов, влияющих в течение того или иного времени на почвообразование. Главной задачей постановки фундаментальных почвенных исследований видится в том, чтобы данные по одному образцу, взятому в известном месте, экстраполировать на определенную группу почв в педосфере. Подобный подход к изучению почв - в рамках системы наук о Земле, легче осуществить, используя принцип иерархической организации: каждый выбранный объект изучения рассматривается как составной элемент объекта более высокого уровня организации и одновременно может быть разделен на элементы следующего, более низкого уровня. Такой подход использован для систематизации ландшафтов, анализа взаимодействия их компонентов с океаном или атмосферой, мониторинга антропогенных воздействий промышленности или сельского хозяйства на ландшафты и почвы.



Высший уровень организации - *педосфера* - результат глобальных различий в характере климата и растительности. Следующий уровень - *природногеоморфологические* регионы, выделяющиеся по рельефу, геологическим и гидрологическим характеристикам и климату, отражают региональные черты почвообразовательных процессов. В пределах природно-геоморфологических регионов выделяются сопряжения почв по рельефу, называемые *топокатенами*. Они образуются как следствие локальных вариаций дренированности почв, растительного покрова, материнской породы, микро-

климата, возраста территории и продолжительности формирования характерных "склоновых" соотношений почв. Почвы с одинаковыми свойствами объединяются в почвенную *серию*. Серии диагностируются по строению *педонов* - трехмерных почвенных тел, достаточно крупных, чтобы в них можно было выявить почвенные горизонты, свойства которых варьируют на микроуровне. *Почвенный профиль* - последовательность почвенных горизонтов, сформированных во времени определенными почвообразовательными процессами. *Горизонты* - компоненты почвенного профиля, и они, в свою очередь, состоят из *агрегатов*, от свойств которых зависит развитие пор разных размеров, формы и расположения. Поры регулируют аэрацию почвы, движение влаги, дренаж. Следующий уровень организации - *комплексы* минералов с органическим веществом и микробными клетками, образующие почвенные агрегаты. Ниже этого уровня мы встречаемся уже с *молекулярными структурами*.

На каждом иерархическом уровне используются свои методы исследования почв.. Объекты самого низкого уровня изучаются микро- и спектроскопически, что позволяет выявить их форму и внутреннее

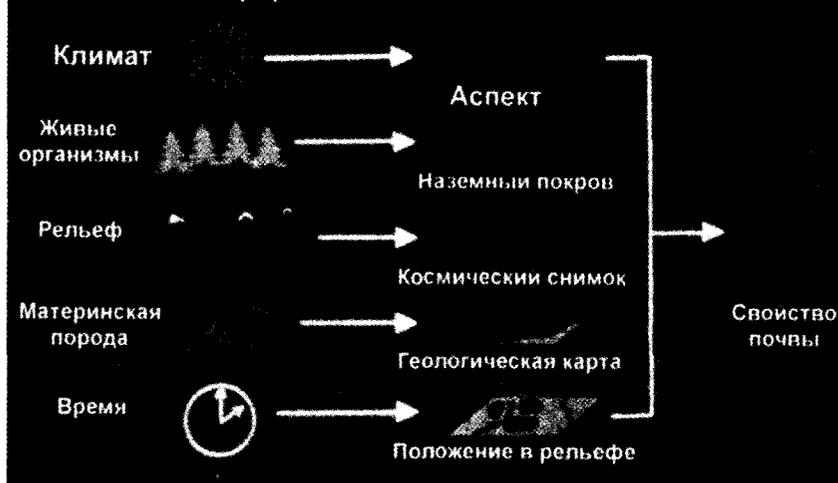
строение (гл. 4 и 5). На мезо-уровне объекты (размеры их измеряются километрами) изучаются прямыми визуальными наблюдениями в одной точке или с помощью космических снимков. Последние позволяют почвоведу знакомиться с обширными участками суши нашей планеты (См. гл. 5).

### Иерархические уровни



Наша планета, как известно, представляет собой большую систему взаимосвязанных компонентов, и ни один из них (океан, атмосфера, живые организмы, почвы) не может быть понят по одиночке. Почвоведом же приходится в наибольшей степени, по сравнению с другими представителями наук о Земле, пользоваться комплексом знаний о процессах на суше и в целях прогноза или смягчения предполагаемых изменений окружающей среды. Опыт глобальных и региональных прогнозов помогает почвоведом использовать данные конкретных "точечных" исследований для более общих построений и экстраполяции. Например, маленький образец, где протекают биохимические процессы взаимодействия между корнями, почвой и микроорганизмами может служить глобальной моделью; можно рассчитать поступление "парниковых газов" на его примере, вызывающее неблагоприятные изменения климата всей планеты (гл. 3). Если не ограничиваться рассмотрением природной вариабельности явлений в пределах интересующего нас территории, необходимой для принятия решений по ее рациональному использованию, а посмотреть шире, то становятся более понятными функционирование и взаимодействие почвы и ландшафта. В результате, принятие решений может быть более универсальным: оптимизированным для качества окружающей среды, многовариантным, сильнее социально ориентированным.

## Зависимости между почвообразующими факторами и слоями информации

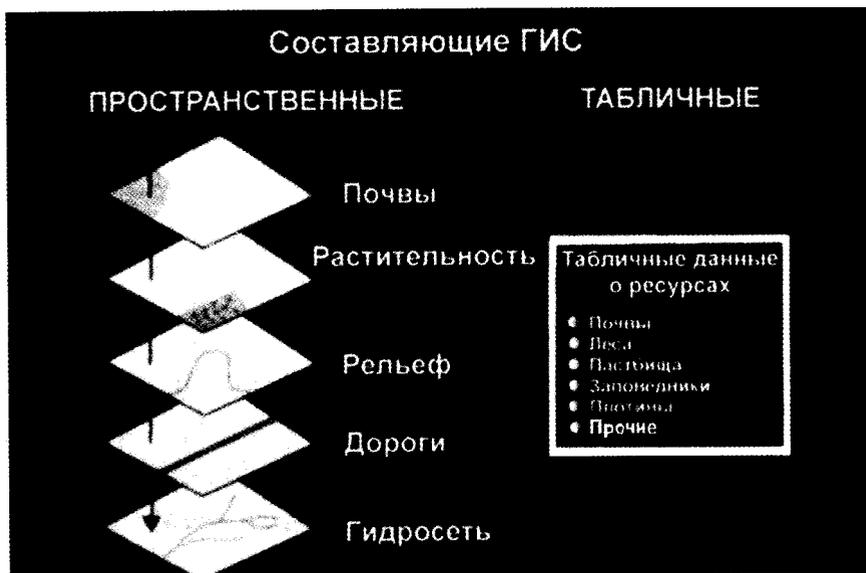


Вклад почвоведов в проблематику наук о Земле может быть еще более увлекательным, если использовать анализ данных в геоинформационных системах (ГИС). Компьютерные технологии дают возможность моделировать почвообразовательные процессы, свойства почв и особенности ландшафтов на основе географических баз данных, позволяют создавать имитационные модели взаимодействия факторов почвообразования. Блоки ГИС включают сбор и обработку данных, их анализ и визуализацию. Для сбора данных используют дигитайзеры, сканеры и другие периферийные системы для перевода информации с карт, датчиков, а также результатов полевых наблюдений в форму, совместимую с ГИС. После ввода этих материалов в ГИС можно изучать зависимости между группами данных. Сведения о почвах, в сочетании с дигитированными моделями рельефа комбинируются в ГИС с гидрологическими и ландшафтными моделями, что дает возможность визуализации или статистической обработки для выявления зависимостей между разными "слоями" данных по факторам почвообразования и свойствами почв. Например, можно смоделировать связи между почвами и ландшафтами, или ландшафтообразующие процессы, пользуясь географическими базами данных, таким образом, чтобы получить результат в виде трехмерных изображений ландшафтов на цветном мониторе.

Глобальные спутниковые системы географических привязок облегчают обработку результатов полевого опробования, увязывают их с данными, полученными дистанционными методами, в результате чего можно создавать карты на основе ГИС. Практическим применением этих новых методов к сельскому хозяйству может быть контроль за эф-

фективным внесением удобрений с помощью точных крупномасштабных карт использования земель, составленных в ГИС. Приложением в более мелком масштабе (например, в масштабе штата) может быть со-

ставление карт эрозионной опасности, прогноза поступления химических соединений в грунтовые воды, рационального размещения новых сельскохозяйственных культур.



Внедрение ГИС в решение вопросов использования земель в США сильно упростится в ближайшем десятилетии в связи с завершением составления почвенных карт всех пахотных земель и значительной части лесов и пастбищ. Имея на вооружении подобную информацию, ГИС способны обеспечить нас базовыми данными о природных процессах в масштабах хозяйства, или водосборного бассейна, или всего мира. В таком случае мы сможем сочетать "экспертные системы" с их привычными, легко доступными способами представления почвенной информации специалистам и общественности с прогнозными моделями и ГИСовским программным обеспечением.

## Реконструкция прошлых географических обстановок

*Палеопочвоведение* занимается изучением почв, сформировавшихся в ландшафтах прошлого (палеопочв). Палеопочвы очень информативны для оценок биологической и физико-химической эволюции Земли. Палеопочвы, как и современные дневные почвы, отражают условия своего формирования и, в зависимости от сохранности, могут служить более или менее надежными индикаторами прошлых обстановок почвообразования. Палеопочвы широко распространены в геологических отложе-

ниях; их типы, вплоть до образовавшихся 3100 млн лет назад, были идентифицированы. Изучение палеопочв старше 1,5 млн лет только начинается, но в связи с ним уже появились оригинальные направления исследований, связанные с историей нашей планеты. Возникает предположения, что жизнь зародилась не в водной среде, как считалось раньше, а в почвах, причем глинистые минералы могли играть роль матриц при синтезе биологических молекул. Эволюция атмосфера Земли, обнаруживается в свойствах палеопочв, сформировавшихся в интервале времени 3000... 1000 млн лет назад, в них особую роль играет железо - индикатор древних уровней содержания кислорода в атмосфере.

Оцениваются хронология и динамика состояния глобальной природной среды, реконструируемые по живым организмам, точнее, условиям их существования, или непосредственно по геохимическим параметрам природной среды, независимо от организмов.

Древнее происхождение крупных групп растений и животных, их эволюционные смены, и, соответственно, возрастающее разнообразие почв - фантастически интересная и многообещающая тема для работ палеопочвоведов. Стратиграфическими методами накоплена обширная информация об ископаемых видах, достоверно различаются сохранившиеся на месте и переотложенные находки ископаемых растений и животных, палеопочвенные же подходы позволят полнее реконструировать геологические обстановки и увязать их с находками этих видов. Можно сказать, что палеопочвоведение обеспечивает связь между экологическим и геологическим масштабами времени, объясняя колебания в биоразнообразии.

Динамика почв и ландшафтов в связи с глобальными изменениями климата традиционно и успешно изучается палеопочвоведом. Так, переход от гумидных/субгумидных условий с развитым растительным покровом к более аридным с разреженной растительностью отмечается резким возрастанием неустойчивости ландшафта, перемещением масс рыхлых отложений, физическими нарушениями почвы. Недавние исследования во внеледниковых районах (аридный юго-запад США) показали, что в течение последних 1,5 млн лет были периоды со значительно



} Современная почва

} Палеопочва в лессах

} Палеопочва в отложениях приморской равнины

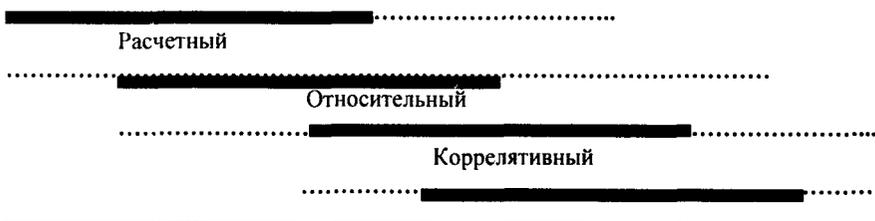
большим атмосферным увлажнением, чем современное. Во время этих периодов активизировались процессы выветривания и почвообразования, увеличивалась продукция биомассы по сравнению с современной обстановкой, где разреженность современной растительности, в сочетании с частыми ливнями, вызывают неустойчивое состояние ландшафта и заметные перемещения в нем рыхлого материала.

## Методы определения возраста

Радио-изотопный	Микро-/Спектроскопический	Химический/минералогический	Геоморфологический	Коррелятивный
Углерод	Трек расщепления	Анализы почв	Развитие почв	Стратиграфия
Калий	Люминесценция	"Пустынный загар"	Эволюция ландшафта	Пеплы
Уран	Резонанс электронного спина	Обсидиан Гидратация	Скорость осадконакопления	Ископаемые Артефакты Стабильные Изотопы

## Типы возраста почв

Численный



Палеопочвенные исследования хорошо отражают воздействие доисторических и исторических цивилизаций на почвы, а в ряде случаев и объясняют в деталях эти воздействия. Расцветы и падения мировых цивилизаций (например, шумеров и финикийцев) во многом были обусловлены характером использования и деградацией почв и вод. Доисторическое подкисление почв Западной Европы может быть результатом сведения лесов, а не глобальных климатических изменений. Эти и другие глобальные проблемы могут быть выяснены с помощью детального изучения почв, погребенных под датированными археологическими памятниками. Такого рода исследования выдвигают предположения о, хотя и замедленном, но губительном действии ряда современных видов использования земель на почвенные и водные ресурсы обширных территорий. По существу, многие наши современные жгучие проблемы существовали и в далеком прошлом.

Использование ископаемых горючих материалов может вызвать глобальные климатические изменения, которые, в свою очередь, будут способствовать подъему уровня Мирового океана и подтоплению прибрежных территорий. По палеопочвам можно многое узнать о климатах доисторического прошлого и их связи с колебаниями уровня Мирового

океана. Сейчас он исключительно высок, близкое положение наблюдается только в течение Сангамонского периода - ок. 122 000 л.н., когда он был на 8 м выше современного. Подробные исследования палеопочв могут дать явные доказательства изменений климата. Мы надеемся также, что изучение прибрежных почв, сформировавшихся во время и после Сангамонского периода, поможет понять и предсказать грядущие глобальные климатические изменения.

Успехи палеопочвоведения зависят от применения новых методов (например, метода стабильных изотопов). Уточнение геологического возраста и периода формирования палеопочв имеет важное значение для их эффективного использования как "хронометров". Все большее значение для построения моделей приобретает теперь информация о скоростях почвообразования. Однако для корректных интерпретаций данных моделирования необходимо уметь отличать унаследованные почвенные признаки от новообразованных. Для этой цели рекомендуется использовать сочетание микроскопии с микрохимическими определениями *in situ*. Проблемы датирования палеопочв тем труднее, чем больше их возраст.

## **Индикационное значение изотопов в почвах**

*Изотопами* называют атомы с одинаковой электронной структурой (и, следовательно, химическими свойствами), но разным числом нейтронов в ядре атома. К *стабильным* относят изотопы, не подверженные радиоактивному распаду. Они существуют у многих широко распространенных в природе химических элементов, таких как водород, углерод, азот, кислород, сера. Поскольку они встречаются достаточно редко, они могут с успехом служить индикаторами условий окружающей среды или "метками" почвенных процессов. Поведение стабильных изотопов в природе - соотношение в разных фазах вещества и нахождение в тех или иных видах живых организмов, определяется факторами равновесия и кинетики, следовательно, измерение концентраций пары стабильных изотопов одного или ряда химических элементов дает весьма интересную информацию о почве. Совершенствование масс-спектрометрических методов и соответствующих способов подготовки образцов сделали возможными подобные определения. С тех пор как почвоведы убедились в их пользе, метод стабильных изотопов стал широко распространенным.

В фундаментальном почвоведении сложилось два пути использования стабильных изотопов. Первый - измерения естественных изотопов в почве с последующей реконструкцией прошлых процессов и условий

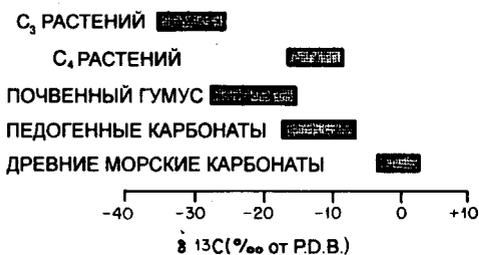
почвообразования. Второй, экспериментальный, предполагает внесение в почву веществ с необычно высоким или низким содержанием определенного изотопа (например, азота  $^{15}\text{N}$ ), которые служат в почве метками: по ним можно проследить процессы трансформации или переноса элементов (соединений) в ходе почвообразования (например, круговорот азота).

Возвращаясь к первому направлению использования стабильных изотопов, обратимся к изотопам С и О в минеральном соединении - карбонате кальция -  $\text{CaCO}_3$ . Обычно карбонаты кальция и магния в почвах считаются хорошими индикаторами перемещений влаги и почвенных процессов, т.к. они легко переходят из раствора в осадок и обратно. Известно, что почвенные (*педогенные*) карбонаты отличаются по изотопному составу от карбонатов геологических отложений, поэтому для их разделения целесообразно измерить содержания разных изотопов. Исследования изотопов С и О в карбонатах кальция информативны для оценок выветривания минералов в почвах на карбонатных породах. Недавно было установлено, что значительная часть  $\text{CaCO}_3$  почв, сформированных на известняках и близких к ним отложениях, не является унаследованной, а представляет собой продукт выветривания исходной породы. Стабильные изотопы С и О применяются для оценок антропогенно-спровоцированного выветривания орошаемых почв. Так, стало известно, что до 40% всего  $\text{CaCO}_3$  в орошаемых почвах может растворяться и вновь осаждаться менее чем за 50 лет орошения. Как и для  $\text{CaCO}_3$ , для силикатных минералов, вступающих в реакции с циркулирующими в почве водами, можно разделить унаследованные и новообразованные формы по различиям в содержании изотопа кислорода. Эти определения возможны как в полевых, так и в лабораторных условиях и позволяют представить себе механизмы и степень выветривания силикатов. Соотношения изотопов кислорода в силикатных минералах могут также указывать на их геологическое происхождение.

Соотношение изотопов С и О в почве находится под сильным влиянием факторов окружающей среды, что дало основания для корреляций

между соотношениями изотопов кислорода в педогенных карбонатах и

**Соотношения изотопов углерода - маркеры растительности, почв, геологической среды**



современными температурными условиями. Недавно была установлена зависимость между интенсивностью и типами фотосинтеза в растениях ( $\text{C}_3$  сравнивается с  $\text{C}_4$ ) и изотопным составом педогенных карбонатов. На

основе этих открытий начались фундаментальные исследования в аридных и семиаридных странах мира по выявлению соотношений между климатом, растительностью и балансом изотопов С и О в педогенных карбонатах. Мы уже знаем, что изотопный состав по углероду зависит как от типов фотосинтеза, так и от развития растительного покрова. Соотношения изотопов кислорода в карбонатах связаны с атмосферными осадками, которые, в свою очередь, зависят от температуры местности. Все это буквально распахивает двери перед палеопочвоведом в плане использования стабильных изотопов для изучения палеоклиматов. Ярким примером реализации такого подхода служит палеопочва в знаменитом Ущелье Олдувэй в Танзании, где по изотопному составу педогенных карбонатов удалось проследить нарастание аридизации климата за последний миллион лет.

Метод стабильных изотопов дает дополнительную информацию о круговоротах С и N (см. подробнее гл. 3). Хранилищем этих элементов, как правило, выступает гумус - неживое органическое вещество почвы.

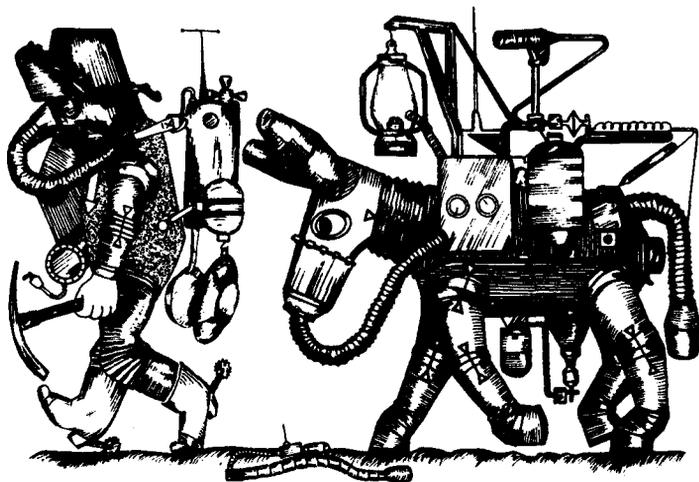
Изучение последствий изменений в использовании земель, весьма обычного явления в США, требует ясного понимания роли гумуса в почвенном профиле, особенно в подповерхностных горизонтах. В частности, вопросы захоронения продуктов аварийных выбросов загрязнителей трудно решать, не представляя себе поведения токсикантов в почве и их взаимодействия с гумусовыми веществами. В исследованиях, посвященным разложению и новообразованию гумусовых соединений успешно применялись радиоактивные изотопы С, что было особенно важно для верхних горизонтов почв. Методы радиоуглеродного датирования возраста позволило рассчитать время пребывания органического С в почве и определить возраст гумуса палеопочв. Сейчас стало известно, что часть почвенного гумуса участвует в "быстром круговороте", длящемся от нескольких лет до десятилетий, тогда как наиболее устойчивая часть гумуса существует в почве в течение длительного времени - от сотен до тысяч лет. Поскольку теперь изучено соотношение стабильных изотопов углерода ( $^{13}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$ ) в растениях с фотосинтезом, стало возможным измерить эти соотношения в почвенном гумусе, чтобы вычислить скорость формирования запасов гумуса из поступающей в почву биомассы. Различия в содержании *стабильных* изотопов N в продуктах химических и биологических преобразований, участвующих в круговороте N, дают возможность определить источники поступления азота в разные среды и объекты. Так, в грунтовых водах с повышенным содержанием нитратов можно обнаружить источники загрязнения: удобрения или деградация почвенного гумуса почвы; можно также рассчитать объемы биологической фиксации азота в почве бобовыми растениями.

## Внеземное почвоведение

Многие люди (во всяком случае, люди, склонные к риску) часто мечтали о полетах и даже о жизни на Луне, Марсе и других планетах. Сейчас наступает время, когда такие мечты могут стать реальностью. Полеты на другие планеты рассматриваются НАСА как часть программы исследования солнечной системы. Программа включает специальные экспедиции с целью посещения человеком других планет (Марс), организацию станций на Луне для проведения внеземных научных исследований, "эволюционную экспансию" - обеспечение присутствия людей за пределами нашей планеты. Программа "эволюционной экспансии" состоит из ряда этапов. Вероятно, на первом этапе будет организована лунная станция с самообеспеченным существованием персонала. Она будет осуществлять подготовку к прилету человека на Марс, однако, до человека предполагается заслать туда несколько роботов для выполнения базовых научных исследований (такова, например, программа сбора и доставки образцов с Марса - MRSR).

Внеземные программы будут, по-видимому, развиваться в первых двух декадах XXI века, поэтому их пора уже готовить. Чтобы обеспечить их успешное и безопасное проведение, необходима основательная научная и технологическая база, и почвоведы должны активно участвовать в ее создании. Их задача - приспособить внеземные "почвы" для выращивания растений, изучить текущее почвообразование на поверхности других планет и возможное прошлое выветривание планетных поверхностей с участием воды.

Станции с самообеспечением (т.е. не требующие возобновления запасов с Земли) рассчитываются на использование местного планетного





субстрата. По одной версии, он может служить средой для культурных растений, выращиваемых для экипажа, и, в таком случае, открываются новые сферы деятельности для исследований почвоведов. Некоторые субстраты никогда не вступали в соприкосновение с водой, органическим веществом или кислород-содержащей атмосферой (например, лунный реголит), поэтому прежде, чем их использовать для растений, необходимо изучить их поведение в земных условиях. Наши достаточно обширные сведения о поверхности Луны, полученные в результате прошлых экспедиций, помогут разработать систему экспериментов в лабораториях Земли с целью изучения взаимодействия смоделированного лунного грунта с водой. Нам надо будет разобраться в факторах, определяющих экологию, активность, динамику, характер популяций микроорганизмов во внеземных средах. Ведь функции микроорганизмов не ограничиваются превращением внеземных субстратов в плодородные почвы, они должны также осуществлять рециклирование отходов, что необходимо в условиях автономного жизнеобеспечения экипажей космических станций.

Выветривание с участием воды отсутствовало на лунной поверхности, тогда как на других небесных телах (Марс, астероиды, кометы) оно имело место. Поэтому в ходе космических экспедиций предполагается детальное изучение их поверхностей; таковы марсианские программы (MRSR), программа встречи комет с пролетающим астероидом (CRAF). Обе программы могут осуществиться в конце текущего десятилетия. В ходе интерпретации данных обработки привезенных с небесных тел образцов почвоведов придется участвовать в междисциплинарных про-

граммах. Ученые-планетологи будут прибегать к помощи почвоведов для объяснения прошлых условий почвообразования (например, палеоклимата), повлиявших на развитие поверхности планеты. Вместе с тем, инопланетное почвоведение - Прекрасный шанс для переоценки земных факторов почвообразования с новых, космических, позиций. Так, если нет жизни на Марсе, то и почвообразование на нем протекает без участия биологического фактора. Вероятно, придется описывать минералы или другие компоненты твердой фазы, которые неизвестны на Земле. Столь необычные исследования могут быть очень продуктивными: они не только улучшат сложившиеся фундаментальные представления о почвах, но и помогут предприимчивым любознательным людям освоить другие планеты.