

Глава 5

ФИЗИКА И ПОЧВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Чем занимаются специалисты по физике почв

Не стоит удивляться тому, что профессионалы в области физики почв используют физические законы применительно к свойствам почв и для понимания почвенных процессов, особенно тех, которые связаны с переносом вещества и энергии. Как и в других областях физики, при этом применяется математический аппарат, и изучаемые процессы количественно оцениваются и прогнозируются на основе математических моделей. Вместе с тем главное отличие физики почв от других "физик" связано с тем, что почва - неоднородная и *живая* среда. Следовательно, чрезвычайно трудно проводить измерения и давать количественные оценки почвам, поэтому в реальной жизни приходится находить компромисс между точностью математики и операциональностью методологии. Тем не менее, специалисты в области физики почв были и остаются лидерами в измерении и моделировании процессов, протекающих на уровнях в несколько метров над и под земной поверхностью.

Перед специалистами по физике почв XXI века стоит немало важных задач, среди которых наибольшее практическое значение имеют задачи, связанные с устойчивостью земледелия, борьбой с загрязнением и охраной окружающей среды в региональном и глобальном масштабе. Откуда бы ни поступали химические соединения, как опасные, так и полезные, они проходят через водную и воздушную среды. В почву они поступают в основном вблизи дневной поверхности - именно там, где особенно существенны знания физики почв. Именно здесь необходима интеграция исследований по физике, химии, биологии, которая позволит понять долговременно протекающие почвенные процессы, контролируемые трансформации и перенос вещества. Например, в последние годы были достигнуты большие успехи в разработке новых штаммов микроорганизмов с измененными генетическими структурами, которые способны разлагать токсичные соединения, выполнять функции пестицидов или стимуляторов роста растений (см. Гл. 3). Однако успешное использование этих удивительных открытий во многом будет определяться судьбой микроорганизмов в почвах, в частности, их выживанием и подвижностью в почвенной среде, условия в которой зависят от физических и химических процессов.

Понимание существа явлений
и мелиорация



Фундаментальные области

Измерения и анализ

Пирамида интересов физики почв

Исследования в области физики почв, как фундаментальные, так и прикладные, определяются необходимостью решения, по меньшей мере, трех задач: прикладных, связанных непосредственно с потребностями общества; развития и применения новых измерительных и аналитических методов; создание фундаментальных знаний. Фундаментальное знание и соответствующие базовые исследования - главный источник (последняя инстанция) принятия решения по прикладным вопросам и по вопросам совершенствования технологий.

Новые подходы к фундаментальным исследованиям могут, например, обеспечить создание физически обоснованной параметрической модели, описывающей взаимоотношения между содержанием почвенной влаги и заключенной в ней энергии. Модель может пройти возможную теперь апробацию путем тщательных экспериментов с использованием рентгеновской компьютерной томографии и других высокочувствительных методов. На молекулярном уровне механизмы движения воды можно изучать в суперкомпьютерных и имитационных моделях динамики поведения отдельных молекул воды на контакте с поверхностями почвенных минералов. Такого рода новейшие подходы чрезвычайно перспективны, они могут выявлять особенности неравновесных состояний в почвах, влияющие на характер переноса воды и растворенных в ней веществ механическим или химическим путем. Методы непрерывных потоков в масштабе почвенных пор могут быть использованы для того, чтобы определить происхождение микробных экосистем по отношению к данному участку почвы: являются ли они инситуными или аллохтонными. Те же методы можно отнести и к изучению ризосферы - процессов роста и метаболизма корней и их связи с химическими, физическими и микробиологическими характеристиками ризосферы (гл. 3, 4). Знание динамики газовой фазы почвы необходимо для изучения пере-

мешений в почве летучих органических жидкостей (продуктов аварийных разливов каких-либо промышленных растворителей). С помощью новой микроскопической техники можно анализировать морфологию порового пространства и соответствующие геометрические закономерности распределения потоков по порам, что позволит прояснить детали переноса и захвата летучих жидкостей.

Почвы и нижележащая вадозная зона пространственно неоднородны, что предопределено их генезисом (см. гл. 2). В последнее десятилетие произошли изменения в нашем понимании процессов миграции в этих неоднородных средах. Влияние пространственной неоднородности на миграционные процессы прежде оценивалось на основе детерминированных распределений, позже - вероятностных, теперь же они осознаются концептуально с позиций *стохастических* и *случайных* подходов.

Новые концепции заставляют улучшать математические модели, описывающие и учитывающие неоднородность почвы во всех пространственных масштабах (О пространственной неоднородности подробнее см. гл. 2). Несмотря на относительную удачность последних моделей передвижения воды на разных уровнях, мы еще очень далеки от того, чтобы осознать передвижение химических соединений в почвенных телах разного иерархического уровня, начиная от лабораторного образца до участка местности, а тем более до водосборного бассейна. Трудности понимания химических миграций в природе усугубляются отсутствием емких и надежных баз данных. Нам необходимо прибавить к полудюжине уже имеющихся достаточно детальных исследований на ключевых участках (case studies) новые исследования для разработки новых поколений моделей и соответствующих им программ натуральных наблюдений.

Миграции в почвах

В отличие от многих других систем, которые можно классифицировать как твердофазные, жидкие или газообразные, почва не может быть отнесена ни к одной из названных категорий. Ее твердая фаза состоит из смеси разнообразных минералов, живых организмов и органического вещества неопределенного состава. Ее жидкая фаза содержит органические и неорганические соединения с быстро меняющимися концентрациями от поры к поре. Ее газовая фаза содержит те же газы, что и атмосфера, но может сильно отличаться от нее по их соотношениям. Отличия касаются водяного пара, кислорода, двуокиси углерода, оксидов азота и метана. Вода может одновременно находиться в почвах в твердом, жидком и газообразном состояниях. Жидкая вода уже в чистом виде обладает рядом сложных свойств, которые еще больше усложняются благодаря взаимодействиям и связям с почвенными частицами. Все эти обстоятельства не следует забывать при рассуждениях о переносе вещества в почве.

При описании поведения воды в почве мы пользуемся теми же общими понятиями, что и при рассмотрении других физических систем: скорость и ускорение, потенциальная и кинетическая энергия, силовые поля, законы сохранения энергии, количества движения и массы. Наши знания о перемещениях воды в почвах основываются на блестящих пионерных работах Эдгара Букингема, Вилларда Гарднера и Л.А. Ричардса, проводивших специальные длительные опыты и обосновавших многие современные теории. Их разработок хватило на два поколения исследователей физики почв, решавших практические задачи состояния воды в почвах, расчетов ирригационных и осушительных систем

и другие вопросы, связанные с сельских хозяйством и торговлей. Сегодня нам необходимо значительно больше фундаментальных знаний для правильных оценок и для управления качеством и количеством воды, перемещающейся в почве. Значительное влияние на выбор приоритетов в фундаментальных исследованиях оказало общественное мнение, сильно обеспокоенное химическим загрязнением земель и вод, недостаточностью изоляции токсичных жидких и твердых отходов. Некоторые из актуальных направлений фундаментальных исследований таковы: (1) - выявление функциональных зависимостей между содержанием и энергией почвенной влаги на основе базовых принципов, которые должны заменить локальные, эмпирические или параметрические модели; (2) - количественная характеристика миграций влаги в неоднородных температурных условиях, при наличии градиентов концентрации растворенных соединений; (3) - оценка взаимодействий

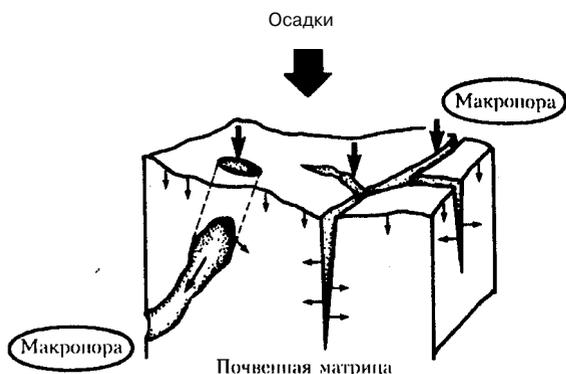


Волнистые формы горизонтов в почве с процессами сжатия-набухания

между влагой и почвой, вызывающих деформации почвы (явления набухания - усадки); (4) - описание неустановившегося совместного переноса влаги, тепла и растворов в их взаимодействии и под влиянием метаболизма, роста и распада популяций микроорганизмов и (5) - поведение летучих органических жидкостей в частично водонасыщенных почвах.

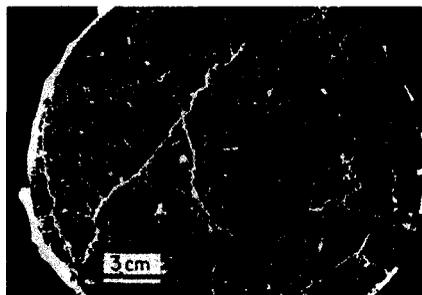
Потоки в макропорах

Термин *почвенные макропоры* относится к нескольким типам пустот в почвах: ходам почвенной фауны, корней, трещинам иссушения, "карманам", возникающим при неустойчивости фронта намочения. Функционально все эти элементы могут быть определены как *предпочтительные* пути миграции, а движение воды и веществ по ним может быть названо *предпочтительным* (приоритетным) потоком. Потоки воды по макропорам кратковременны, время их пребывания в почве обычно в 2-



Макропоры: почвенная влага на "горячей линии"

3 раза короче, чем время поступления воды на поверхность почвы. Если мы предполагаем, что движение воды по макропорам не подвержено действию капиллярных сил, то, поступившая на поверхность вода может просачиваться по макропорам со скоростью, превышающей скорость инфильтрации в почву, поскольку в последнем случае на нее влияют одновременно гравитационные и капиллярные силы. Химические соединения, перемещаясь по макропорам в водных растворах, не имеют непосредственного контакта с почвенной массой, и относительно слабо взаимодействуют с отдельными частицами почвы. В результате, вода с растворенными в ней веществами значительно быстрее достигает глубоких почвенных горизонтов и грунтовых вод чем если бы она просачивалась через почвенную массу. В общем, было уже достаточно давно известно, что перенос воды и вещества часто определяется макропористостью, однако лишь недавно макропоры стали вводить в прогнозные модели.



Флуоресцирующие красители выявляют рисунок почвенной порозности

Количественная оценка переноса по основным путям миграции осуществлялась двумя способами. Один, прямой метод, заключается в определении геометрических параметров макропор (форма, протяженность, число) с помощью красителя или химической метки, что требует много времени, недешево и не приемлемо в ограниченном числе случаев. Поэтому используются косвенные методы, такие как моделирование влияния основных каналов миграции на перенос воды и

химических соединений в тщательно поставленных опытах, рассчитанных на основе полевых измерений. Полученные данные интерпретируются с помощью процессных моделей, и могут быть полезны для прогнозов. Одна группа моделей представляет пространственное распределение воды и химических соединений в почвенной матрице после того как поток по макропорам прекратился, и дальнейшее движение подчинено действию силы тяжести и капиллярным силам. Для таких моделей нужна информация о геометрии порового пространства, и в первую очередь - интерфейсов. Последние, понимаемые как зоны взаимодействия между почвенной матрицей и пустотами, рассматриваются как изогнутые продолжения дневной поверхности, входящей в почву, через которую в условиях полного насыщения движется водный поток. Другая группа моделей описывает поток непосредственно в макропорах на поверхности и внутри почвенной матрицы для рассмотрения движения воды и растворенного вещества. Неустановившийся поток в макропорах описывается теорией *кинематических волн*, при условии, что гравитация служит единственной движущей силой, а скорость и интенсивность движения потока через макропору определяются содержанием влаги. По мере поглощения влаги окружающей макропору почвенной массой, скорость и интенсивность потока уменьшается в соответствии с количеством воды, поступающим на поверхность почвы, и со свойствами потока. В нынешнем поколении существующих кинематико-волновых моделей принимается, что поток на нижней границе почвы находится в условиях атмосферного давления приземного слоя. При разделении в моделях гравитационных и капиллярных сил кинематико-волновой подход может быть использован также и для потоков, движущихся преимущественно капиллярными силами.

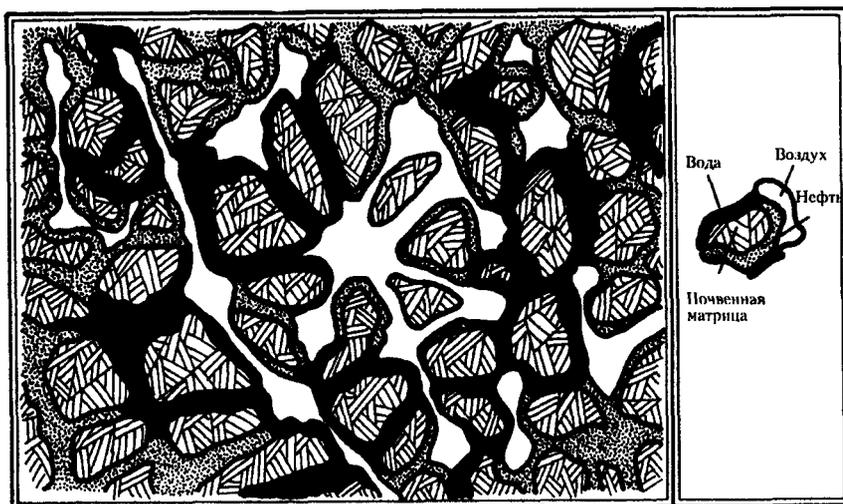
В оценках массопереноса в почвах с макропористостью встает задача соединения теорий потенциального потока и потока в пограничном слое. Необходима техника для экспериментов, позволяющая измерить основной поток *in situ* в порах капиллярных размеров. Необходимы

приборы для измерения почвенной влаги с чувствительностью примерно в 10 раз большей, чем у имеющихся в настоящее время приборов, поскольку в миграционных процессах может участвовать всего 5% почвенной влаги и меньше. Другая задача - развитие теоретических подходов на основе морфометрических данных (см. Гл. 2) в определении параметров потока по макропорам; такой подход позволит использовать уже накопленную базу данных.

Многофазный поток

Многие потенциальные загрязнители грунтовых вод поступают непосредственно на дневную поверхность или в почву из атмосферы, при аварийных выбросах, просачивании из трубопроводов и хранилищ, или при неправильном захоронении отходов. Загрязнители могут перемещаться в виде потоков или диффузно, как в жидкой так и в газовой фазе. Значительная часть веществ, загрязняющих окружающую среду, представляет собой слабо растворимые в воде органические соединения; таковы промышленные растворители, автомобильное или самолетное топливо, образующие самостоятельную жидкую фазу в почве. Модели многофазного потока удобны для оценки масштабов и эффекта внутрипочвенного загрязнения химическими соединениями, в т.ч. жидкими органическими, а также для выработки стратегии рекультивации. Разработка и использование таких моделей порождает массу вопросов, начиная от концептуальных - физических законов поведения многофазных потоков, оценки скорости и равновесных состояний массопереноса в пограничных условиях, до применения эффективных и точных численных методов для решения сильно нелинейных пар дифференциальных уравнений в частных производных, а также надежных и простых обратных математических методов для упрощения калибровки моделей.

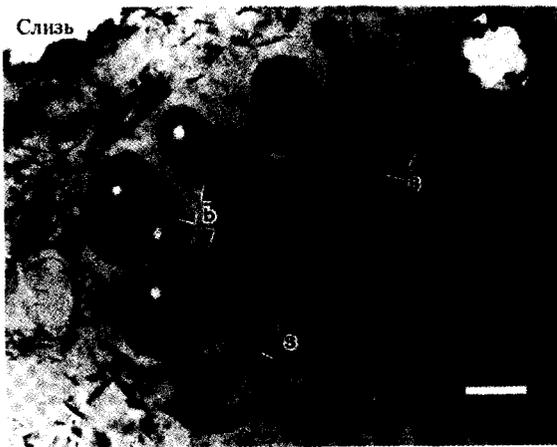
Для моделирования переноса химических соединений в составе водных растворов, органических жидкостей, газов и в суспензиях нужны уравнения баланса масс и потоков для каждого соединения в каждой фазе дополнительно к уравнениям, описывающим миграции всех фаз. Затем эти уравнения группируются математическими способами в соответствии с соотношениями между массопереносом в отдельных фазах. Если достигнуто равновесие в какой-либо фазе, то уравнения, описывающие поведение компонентов, суммируются для данной фазы, что уменьшает общее число требуемых уравнений. Могут возникнуть трудности при выяснении состояния равновесия, устанавливающегося между компонентами разных фаз, поскольку состав их определяется коэффициентом участия, это - трудная задача, которой стали заниматься совсем недавно. Неравновесные эффекты могут возникать на уровне пор в связи с ограничениями массопереноса на границе раздела фаз, а также



на более высоком уровне в связи с неодинаковой скоростью движения жидкостей. Было проведено широкое исследование моделей для разных вариантов взаимодействий твердой фазы с жидкой, однако комбинации "жидкость - жидкость" и "жидкость - газ" почти не анализировались.

Миграции микроорганизмов

Функции почвы заключаются в удержании и ограничении возможностей проникновения патогенных микроорганизмов в грунтовые воды. Поэтому целесообразно обратить внимание на факторы выживания и миграций патогенов в почве. Патогенные бактерии сохраняются в почве главным образом в мелких порах (ловушках), тогда как значительно более мелкие патогенные вирусы сорбируются почвенными частицами и корнями. Однако некоторые патогены могут преодолевать почвенный барьер, проникать в грунтовые воды и даже существовать в них долгое время. Недавние успехи в области биотехнологий позволяют нам обнаружить при полевых исследованиях по инвентаризации загрязнения грунтовых вод и по изучению миграций вирусов в местах складирования промышленных отходов (см. гл. 3 о методике) важные вирусы, обитающие в водах (например, вирус инфекционного гепатита А, ротавирус, вирус Norwalk - основной возбудитель гастроэнтерита). Для получения таких данных используются вирусы бактерий, моделирующие поведение вирусов животных. Первые безопаснее и дешевле, их применение ускоряет процесс получения данных. Поскольку вирусы бактерий менее опасны, можно организовывать ширококомасштабные полевые ис-



ФИЗИКА РИЗОСФЕРЫ:
клетки бактерий (Б) и приклеивающиеся частицы
почвы (s)

родного местного микробного населения почвы. Совершенно ясно, что дальнейшее развитие техники отслеживания микроорганизмов, основанное на опыте молекулярной биологии и новых микроскопических методах прямых наблюдений, внесет большой вклад в понимание главных механизмов перемещений микробов. Решению проблемы будет также способствовать более тщательные описания взаимодействий между клетками микроорганизмов и почвенными частичками и, что может быть еще более важно, лучшее понимание движений воды в физически неоднородной структурной почве. Основной водный поток с растворенными или взвешенными соединениями, движущийся по крупным каналам миграции - благоприятный объект для изучения быстрых миграций микроорганизмов. Значение движения потока по макропорам всеми теперь рассматривается как явление, заслуживающее внимания, следующей задачей можно считать характеристику и количественный прогноз переноса в нем микроорганизмов.

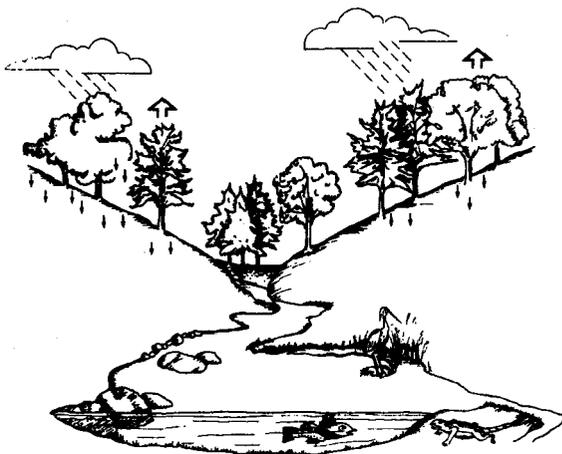
следования с их вирусами в качестве метки. Результат улучшит верификацию и оценку моделей.

Общими усилиями почвенных микробиологов, химиков и физиков было проведено изучение быстрого переноса микробов в почвах. Для слежения за миграцией микроорганизмов были взяты "меченые" мутанты интересующего исследователя вида, устойчивые к действию антибиотиков, легко выделяемые среди разно-

Движение воды в лесных водосборах

Дождевые воды, поступающие на залесенный водосбор, частично перехватываются растительностью (*перехват - interception*), не перехваченная часть этих вод, попадая на землю (*throughfall*) поступает в опад и подстилку, которые, как и растительность, способны ее удерживать (перехватывать). Часть воды из подстилки просачивается в нижележащую минеральную толщу (*инфильтрация*). В общем виде известно, что чем

выше влажность почвы, тем легче она отдает влагу, и вода может быстро стекать вниз по склону *внутри почвы* - *interflow*, а во время сильных ливней и по поверхности почвы по временным ложбинам стока. Поверхностный сток (*runoff*) разделяется на несколько видов по механизмам формирования, и их изучение в лесных районах представляет существенный аспект



Как в лесу зарождается ручей?

строения моделей поведения воды. В периоды между ливнями почва продолжает отдавать свою влагу грунтовым водам, которые, в свою очередь, пополняют гидрографическую сеть (*основной сток* - *baseflow*). После стекания гравитационной влаги, влажность почвы еще может оставаться высокой, и именно эта почвенная влага используется растениями (предельная полевая влагемкость - *Примеч. Ред.*). Пространственная неоднородность гидрологических характеристик почв хорошо известна, и только одна группа пространственно усредненных данных не может быть репрезентативной для всего водосбора в данном случае в связи с нелинейностью зависимости между ускорением потока и влажностью почвы. Неоднородность почвы послужила причиной введения стохастических методов в гидрологические модели, и это позволило выявить модельными опытами гидрологический смысл распределений частот вводимых переменных и их пространственные соотношения. Одним из серьезных ограничений развития подобных моделей является недостаток достоверных исходных данных. Поэтому, успех фундаментальных гидрологических исследований зависит от обеспеченности математических моделей многочисленными натурными наблюдениями.

Лесные водосборы отличаются высокой активностью инфильтрации, по объему нередко превосходящей осадки обычной интенсивности. Быстрый внутрпочвенный сток в лесных почвах благодаря макропорам и более мелким путям миграций (*мезопорам*) - один из механизмов формирования стока на залесенных склонах. Изменения в химическом составе фильтрующихся вод свидетельствуют об интенсивном диффузном обмене химическими соединениями в растворах в макропорах между тонкопористой почвенной матрицей и водой в пределах обширной и

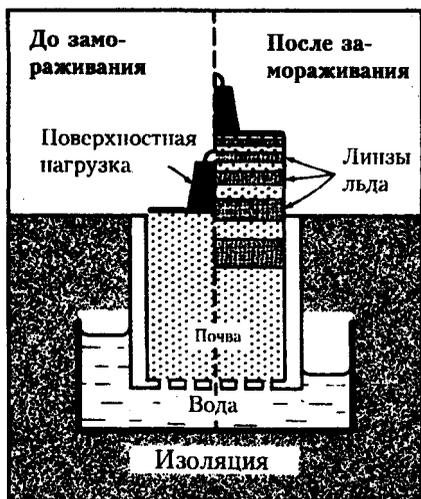
весьма сложной зоны их контакта. Дальнейшие исследования диффузного обмена необходимы в связи с прикладными проблемами, волнующими сейчас общественность: судьба кислотных дождей и удобрений, вносимых под лесные культуры, миграция растворов от отходов, сгруженных на поверхность почвы, либо захороненных недостаточно глубоко.

Рельеф во многом определяет гидрологический режим ландшафта, и анализ топографических факторов широко применяется в прогнозах формирования потоков на склонах. Оценка рельефа дает возможность проводить экстраполяции, и данные гидрологических наблюдений на ограниченных водосборах при наличии соответствующих топографических карт могут быть распространены на обширные территории. Такого рода процедуры сильно облегчаются использованием дигитайзеров и сложных программных продуктов (см. гл. 2). Развитие экстраполяции будет расти, поскольку такие крупные проблемы, как загрязнение воздуха и климатические изменения, решаемы только на уровне региональных и глобальных оценок.

Термомеханические процессы в почвах

В модельных исследованиях обычно не принимаются во внимание многие сложности, столь обычные в почвах: они бывают скрыты в "черном ящике", поведение которого описывается как ответные макро-реакции на макровоздействия. Однако бывает и так, что взаимоотношения между воздействием и результатом настолько сложны и трудно объяснимы, что метод черного ящика оказывается неэффективным. В фундаментальных исследованиях по физике почв приходится тогда спускаться на лшхро-уровень и выяснять физическую сущность протекающих в почве процессов. Одним из примеров такого подхода могут быть термомеханические процессы пучения в почвах, другим - перераспределение влаги в почвах при их промерзании, которое стало объектом исследования при анализе процессов пучения.

Разрушительные последствия мерзлотных педотурбаций весьма обременительны для бюджета общества, вынужденного применять разные превентивные меры по защите дорог, фундаментов зданий, сельскохозяйственных культур, а также оплачивать ремонт при неудачах. Так, угроза саморазрушения при произвольных криотурбациях считается главной проблемой в мерзлотных районах при строительстве трубопроводов для переброски сжиженного природного газа из арктических широт в более теплые зоны. Менее драматично, но все же ощутимо для общества перераспределение стока, связанное с промерзанием-оттаиванием, способствующее активизации смыва тальми водами, следовательно, нарушения режима паводков и заилиение водоемов смытой по мерзлому слою почвой. Базовые физические процессы, приводящие ко всем этим неприятностям, были определены еще 60 лет назад С. Тэйбе-



Опыт Табера

зания, т.е. они развиваются в уже замерзшей почве. Они формируются поодиночке и по очереди, приподнимая вышележащий материал. В процессе замерзания в почвенных порах, содержащих все три фазы (твердую, жидкую и газовую) необычайно быстро концентрируется жидкая фаза из прилегающей незамерзшей еще почвы, так что все поры в мерзлой зоне заполняются льдом. В результате, основные пути миграции растворов оказываются закрытыми до момента таяния снега и полного оттаивания почвы весной, даже если почва находилась во влажном состоянии к моменту начала промерзания.

Исследования почв под микроскопом позволили создать реалистическую физическую модель морозного пучения. В принципе модель разъясняет сложности, известные из опытов по типу "черного ящика", и описывает то, что находится внутри него. Физическая модель для малоупругой почвы без жидкой и газовой фаз (своеобразного, но весьма важного случая) представляет собой систему дифференциальных уравнений, содержащих макроморфологические переменные и отражающую результаты экспериментов по морозному пучению. В то же время более глубокое проникновение в механизмы замерзания воды в тонких порах благодаря наблюдениям под микроскопом имеет значение для понимания широкого спектра физических процессов, начиная от образования геотермального пара над грунтовыми водами, заключенными в тонкопористую породу, до использования ледяных прослоек между фильтровальной бумагой для получения полупроницаемых мембран. Общей особенностью термомеханических процессов в почвах для всех рассмотренных случаев является приуроченность фазовых переходов к по-

ром (S.Taber), показавшим с помощью простейшего прибора, что пучение *не* является простым следствием увеличения объема почвенной влаги. Более того, продвижение фронта промерзания вниз по переувлажненному почвенному профилю приводит к образованию ряда слоев (*линз*) чистого льда. Если переувлажненная почва обладает низкой упругостью, произойдет соответствующее поднятие вышележащих ее частей с последующим заполнением водой образовавшегося пространства за счет соседних водонасыщенных элементов, например, водоносного горизонта. Ледяные линзы растут вслед за опускающимся вниз фронтом промер-

верхностям раздела твердой и жидкой фаз, расположение которых зависит от взаимных комбинаций геометрии порового пространства, сил поверхностного натяжения и избирательности фазовых состояний по отношению к стенкам пор, где идет борьба за ближайшее к стенке поры положение. Фазовые переходы во многом определяются условиями в микролокусах, существующих в почвенной массе вблизи пустот; они влияют на потоки и накопление вещества и тепловой энергии в пространстве между внешними границами и зоной проявления процессов фазового перехода. Успехи в познании явлений в поровом пространстве переувлажненных почв, включая разработку фрактальных моделей, могут быть полезны для оптимизации использования почв северных районов.

Неразрушающие измерения

В физике почв в последнее время используется немало новых методов, разработанных для медицины, космоса и "чистой" физики. К наиболее важным для почв относятся новые неразрушающие методы, позволяющие изучать почвы не вмешиваясь в их естественную "архитектуру" (см. гл. 2).

Компьютерная томография

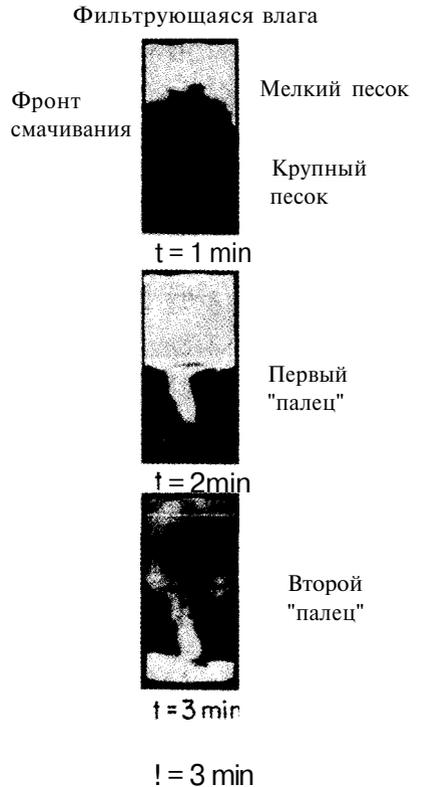
Современные исследования в области физики почв используют методы изучения поверхности объектов в 2-х и 3-х мерном пространстве на микроуровне с помощью рентгеновских и гамма-лучей, ультразвуковой томографии, магнитного резонанса или синхротронное излучение, вызванное рентгеновскими лучами.

Рентгеновская и гамма-лучевая томография дают возможность измерить плотность и влажность почв в равновесных образцах, а также проводить связанные с этими показателями измерения во временном потоке воды. Так, исследовались основные пути миграции в песчаном двухфазном субстрате с целью выяснения явлений "языковатости". Стало возможным также и изучение почвенных пор, диаметр которых >1 мм. Тонкие (<2 мм) уплотненные поверхности комковатых структурных отдельностей изучались с помощью рентгеновских и гамма-излучающих простых и недорогих минисканеров, специально предназначенных для разовых лабораторных определений. Применение минисканеров позволяет использовать различные излучения, связанные с радиоактивными изотопами или рентген-флуоресценцией. Дифференциальная томография позволяет дать количественную оценку процессам дренирования почв благодаря фотоэлектрическим свойствам йода. Рентгеновские и гамма-лучевые сканеры высокого разрешения (1 мкм) позволяют оце-

нивать пространственное распределение в почве воды, воздуха, нефти с определением количеств каждого компонента.

Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР) - эффективный способ измерения количества воды в почвах и одновременно наблюдения почвенных живых организмов или химических соединений, поскольку ЯМР чувствителен к протонам. Так, с помощью ЯМР были получены натурные - *in vivo* материалы о поведении воды и корней растений в водонасыщенных образцах песка, что, к примеру, отлично характеризует поведение воды по отношению к корневым системам молодых растений. Несмотря на некоторые ограничения метода ЯМР в отношении почв, были обнаружены немалые его возможности для оценок на микроуровне процессов замерзания-оттаивания в песчаном образце. Интерфейс "жидкость - лед" в чистой воде (без примесей песка) имеет, как выяснилось, очень узкую зону (порядка 100 мкм или меньше) значительного усиления сигнала, свидетельствующего о структурных изменениях при переходе от жидкой фазы с ее неупорядоченными молекулами к твердофазным ледяным структурам.

Рентгеновские детекторы высокого разрешения и высокоградиентные магнитные поля, ставшие доступными для почвоведов относительно недавно, а также программы быстрого создания образов и быстрой аккумуляции больших объемов информации в базах данных делают возможным развитие новой формы микроскопирования в физике почв на уровне разрешения порядка микрометра (микротомография), которая дает трехмерную картину (образ) внутренней структуры почвенного образца. При наличии источника синхротронного рентгеновского излучения, образцы могут быть сканированы меньше, чем за 1 час при разрешении около 1 мкм после удаления искажений. В лабораторных условиях уже были получены результаты (образы) с помощью рентгеновских методов с разрешением 10 мкм, а ЯМР - с разрешением 5 мкм.



Рентгеноструктурная томография просачивания влаги

Дистанционные методы в изучении физических свойств почвы

Неразрушающие определения свойств почв могут быть выполнены путем измерения отраженной и излучаемой солнечной радиации (см. гл. 2). Радиационные спектры зависят от химических и минералогических свойств отражающей поверхности почв и от (внешних по отношению к почве) метеорологических условий. Например, механический состав почвы видоизменяет соотношения между количеством гумуса и величиной отраженной радиации, в то время как спектральные характеристики гумуса различаются и по климатическим зонам. Положение солнца в небесной сфере и угол наблюдения вносят дополнительные коррективы в оценки величин и спектрального состава отраженной и излучаемой почвой радиации. Принципы дистанционных методов заключаются в использовании данных о распределении и количестве разных видов радиации для получения базовой информации о биофизических характеристиках почвы. Целью же исследований по физике почв является при-ложение подобных неразрушающих технологий, приемлемых для вертикальных и латеральных поверхностей к описанию динамического трехмерного почвенного тела с его пространственной неоднородностью в разных ландшафтных и климатических условиях. Однако составление карты - не единственная цель дистанционных методов. Специалист по физике почв, зная состояние и свойства конкретной почвы и имея опыт в области почвоведения, стремится выявить связи между почвенными процессами и внешними синоптическими факторами путем использования на обширных территориях датчиков, с высокой частотой регистрации наблюдений. Это может быть сделано несколькими способами (см. гл. 2):

1. Измерение свойств почв и почвенных процессов в одной точке может осуществляться подачей электромагнитного сигнала путем интерактивного моделирования физических и химических параметров почвы, определенные комбинации которых дают сигнал, регистрируемый дистанционным методом. Созданы новые модели, связывающие отражательную способность почвы с ее физическими свойствами, например, влажностью, содержанием органического вещества, наличием минеральных пленок, механическим составом, структурой, свойствами поверхности.

2. Экстенсивные и систематические наблюдения могут быть основанием для экстраполяции данных по физике и химии почвы в одной точке на целые почвенные ландшафты с использованием соответствующего аппарата.

3. Сбор систематических спутниковых данных в определенные моменты времени может быть полезен для мониторинга эрозионных процессов, оценок продуктивности, водных ресурсов, динамики экосистем, а также динамики глобальных процессов, определяемых характером

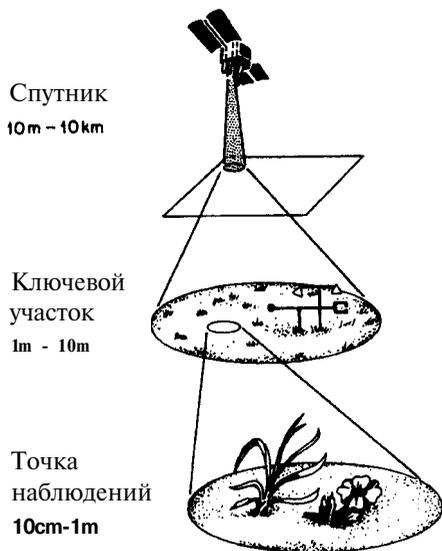
ландшафтов, почвообразующими породами, климатическими изменениями.

4. Развитие концептуальных представлений может быть весьма полезным в оценках вклада почв в радиационный баланс суши (потoki тепла из почвы и в почву, медленный перенос тепла, излучение земной поверхностью).

Большинство дистанционных методов находится еще в младенческом состоянии, и физика почв лишь начинает приближаться к фундаментальному знанию крупномасштабных процессов. Однако, дистанционные измерения температуры поверхности почв и альбедо (относительное отражение солнечного света) в сочетании с соответствующими имеющимися метеорологическими данными могут быть надежной основой для прогноза эвапотранспирации экосистем. Теперь, благодаря измерениям теплоотражения с поверхности суши, можно ежедневно получать сведения о запасах влаги в почвах. Следовательно, возможен мониторинг водосборных бассейнов и прогноз объемов стока, а также и эрозионной опасности.

Можно фиксировать также динамику иссушения поверхностных почвенных горизонтов и увязывать ее с режимами верховодки и грунтовых вод.

Дистанционные методы позволяют решать крупные комплексные проблемы, например, определить скорость трансформации растительного покрова Земли в результате изменений величин альбедо, балансов воды и энергии. Глобальные проблемы - климатические флуктуации, кислотные дожди, обезлесивание, эрозионные потери требуют динамичных, широкомасштабных наблюдений на постоянной основе и в течение как можно более продолжительного времени. Дистанционные космические методы предоставляют прекрасные возможности мониторинга почвенных ресурсов в мировом масштабе для оценки роли почв в динамике парниковых газов и глобальных изменений климата, связанных с нарушениями пространственных закономерностей альбедо и эвапотранспирации. В изучении экосистемных процессов на глобальном и



Каскадная система методов исследования

РАДАРЫ ДЛЯ ПОЧВ: РАДИОМЕТРИЯ

Физики почв тратят массу времени на выяснение того, как вода поступает в почву, накапливается в ней или просачивается за ее пределы. Основой для таких расчетов должны быть точные определения количества воды в почве. В последнее десятилетие был предложен новый радиометрический метод, названный *time domain reflectometry* (TDR). Он основывается на измерении времени, необходимого для прохождения волн, излучаемых радаром, через известную толщину вглубь или параллельно земной поверхности. Нахождение волны со спутникового радара, проникающей в почву (грунт), влияет количество воды в почве, что и было достаточно успешно использовано для измерения влажности. Одной из трудностей разработки метода подобных измерений является неточное знание глубины проникновения радарного излучения в почву, что, естественно, влияет на точность результата.

Измерения методом TDR осуществляются с помощью миниатюрного ручного прибора, измеряющего прохождение радарных волн в почву. Пройденное расстояние фиксируется двумя параллельными зондами, регистрирующими движение волны. Поскольку зонды могут быть очень тонкими, метод пригоден и в лабораторных условиях для определений изменения в содержании почвенной влаги на малых расстояниях. Твердая фаза почвы значительно меньше влияет на прохождение волны, чем жидкая, поэтому метод может применяться с универсальной калибровочной кривой в большинстве минеральных почв.

Метод TDR значительно эффективнее обычных измерений влажности. Недавними исследованиями было показано, что он может использоваться и для измерений электропроводности почв, связанной самым непосредственным образом с содержанием легкорастворимых солей. Чем больше солей присутствует в почвенном растворе, тем сильнее радарная волна стремится "просочиться" в стороны от ведущих ее зондов. В результате, интенсивность возвращающейся в детектор радарной волны соответствует содержанию солей. Интересной особенностью метода является также то, что он распространяется только на незамерзшую воду. Для волны лед аналогичен твердой фазе. Однако в почвах, даже при очень низких температурах замерзает не вся вода, и именно методом TDR можно выявить долю незамерзшей воды.

региональном уровнях дистанционные методы могут обеспечить систематизацию и достоверную экстраполяцию данных единичных натурных наблюдений, как всегда, недостаточных для характеристики обширных территорий. Рост общественной заинтересованности в расширении пахотных площадей с целью увеличения производства продуктов питания заставляет обращаться к дистанционным методам как надежному средству ускорения работ по почвенной съемке, мониторингу почвенных условий, потенциальной продуктивности почв и их ответных реакций на антропогенные воздействия.

Новые аналитические методологии

Аналитические методологические приемы, например, обратные методы и определение параметров были всегда доступны почвоведом, однако, в связи с ростом компьютерных возможностей они приобрели новые сферы применения. Стало реальным планировать более сложные эксперименты и интерпретировать их результаты с помощью *параметрических моделей*, даже для совершенно нелинейных явлений. Методы *геостатистики*, разработанные для добычи полезных ископаемых и адаптированные для гидрологии и физики почв, позволяют определять пределы достоверности полученных результатов мониторинга и опробования. Значительного прогресса можно ожидать в сфере теории благодаря внедрению *фрактальной геометрии* и *детерминистских стохастических моделей* (уже популярных в "чистой" физике и технике), для целей уточнения зависимостей между размерами почвенных частиц, характеристикой пор и потоком воды.

Обратные методы и определение параметров

Снижение стоимости компьютеров и расширение их возможностей, параллельно с ростом наших знаний об основных биологических, химических и физических процессах в почвах, заставляют ожидать быстрого развития компьютерных моделей. Вместе с тем, все большее усложнение моделей всегда требует более детальных, иногда особенно строго локализованных исходных данных для построения модели. Эффективность модели в очень большой степени зависит от нашей способности точно определить параметры, которые необходимо ввести в модель.

Проблема выявления свойств системы по ее реакции на определенный импульс известна как *обратная задача*, тогда как прогноз изменений свойств системы представляет собой *прямую задачу*. Один из новых и перспективных подходов к характеристике процессов массопереноса в почвах заключается в решении обратной задачи, используя процедуру

оптимизации нелинейных параметров. Вообще говоря, подход, связанный с оптимизацией параметров, допускает гибкость в планировании эксперимента, он требует лишь определенности в соответствующих начальных и пограничных условиях. Имея эту информацию и математическую формулировку главных физических понятий, можно определить неизвестные параметры модели "проигрывая" ее с любыми доступными данными. Если удастся также оценить доверительные границы параметров модели, то можно оценить достоверность модели при данных параметрах.

Важной областью применения метода оптимизации параметров является одновременное определение параметров переноса воды и химических соединений, которые обычно определяются отдельно; при этом водный поток считается устойчивым и однородным для упрощения анализа миграций химических соединений. Эти допущения становятся ненужными при использовании метода оптимизации параметров. Миграции растворенных химических соединений можно рассчитать, зная поведение водного потока, тогда как эти данные, в свою очередь, являются элементом характеристики водного потока.

Отдавая дань полезности метода оптимизации параметров для рассмотрения переноса воды и химических соединений, хотелось бы все же отметить, что методы оптимизации нелинейных параметров более продвинутые в плане расчетной поддержки, требуют эффективных оптимизационных алгоритмов и методов для оценки чувствительности параметров. На результаты могут повлиять, например, неверные предположения о погрешностях в исходных данных. Модель, пригодная для имеющегося набора данных, может быть неадекватной в других ситуациях. Непросто бывает также определить доверительные границы параметров модели. Перечисленные аспекты становятся более реализуемыми при сотрудничестве математиков, статистиков и физиков почв. Немало полезного можно также узнать и из других научных дисциплин, пользующихся методом оптимизации параметров, например, из теоретической гидрологии. Одной из актуальных задач фундаментальных работ по физике почв может быть создание программ экспериментов, полностью использующих возможности метода оптимизации параметров; целесообразно одновременно заняться поиском данных для обеспечения математически корректных обратных задач.

Геостатистика

Геостатистика, в общем виде, представляет собой инструмент использования разбросанных в пространстве данных измерений, которые путем статистической обработки могут подвергаться интерполяции и объединению. Картографирование и таксономическая классификация почв в течение долгого времени были предметами особого интереса для

сельского хозяйства и торговли в своих качественных приложениях. Некоторые прикладные задачи, однако, требуют количественного представления пространственной информации, и это именно то, что может сделать геостатистика. Использование геостатистики в почвоведении началось недавно. Были приняты некоторые подходы, уже апробированные в строительстве и гидрологии, но они не совсем подходят при работе с почвенными данными. Пока еще не совсем ясно, какие задачи должны поставить почвоведы перед геостатистиками, и использование геостатистики носит элемент первичного накопления информации: собрать данные, применить геостатистические методы и посмотреть, что из этого всего получится. Полевые почвенные исследования никогда не бывают исчерпывающими, и потому всегда стоит задача, как экстраполировать или интерполировать данные, полученные в нескольких точках на большее пространство или время. Весьма обычны и актуальны вопросы: "А сколько нужно образцов?", или "Насколько достоверны результаты?" В прошлом недостаток данных нередко служил главным научным ограничением возможностей прогнозирования. Сейчас действительно важными вопросами становятся качество, польза, достоверность, особенно в связи с автоматизацией многих аналитических определений, т.е. возможностью иметь тысячи данных анализов.

Существует несколько приемов геостатистики для обработки всей информации, а не только исходных экспериментальных данных. Один из них - *ко-регионализация* - аналог методов регрессии в традиционной статистике. Особенно удобен этот метод при малом количестве образцов, он оперирует с малым набором переменных первого порядка и значительно большим - второго. Например, если имеется густая сеть данных по механическому составу и лишь несколько измерений влажности на том же участке, недостающие сведения по влажности могут быть получены расчетным путем на основании данных о механическом составе.

Два других сравнительно новых приема - *дизъюнктивный и псевдо-кригинг* (термин "кригинг" предложен в честь известного статистика Д. Криге - D.Krige). С помощью дизъюнктивного кригинга определяется вероятность высоких показателей для какого-либо свойства почвы в пределах территориальной единицы. Например, при оценке пространственной картины распределения легкорастворимых солей в почвах какого-либо поля определяются вероятности очень высоких и очень низких концентраций. Псевдо-кригинг оперирует с набором свойств почв в определенной точке, при этом предполагается что свойства взаимосвязаны и могут быть сгруппированы таким способом, что возникает дополнительная информация.

Другой перспективной областью является сопряженный анализ данных, полученных дистанционными методами, с наземным натурным опробованием с целью создания иерархии ландшафтов. Так, площадь спутникового пикселя (участка опробования) составляет несколько десятков кв. метров; аэрофотоснимка - несколько кв. метров; наземными

измерениями охватывается всего лишь 1 м^2 . Данные этих трех источников информации можно объединить с помощью регуляризации или блок-кригинга, допускающего экстраполяцию с точечного источника на площадь. Методология блок-кригинга аналогична методам экстраполяции микроскопических измерений при компьютерной томографии на более высокие уровни организации почвенной массы.

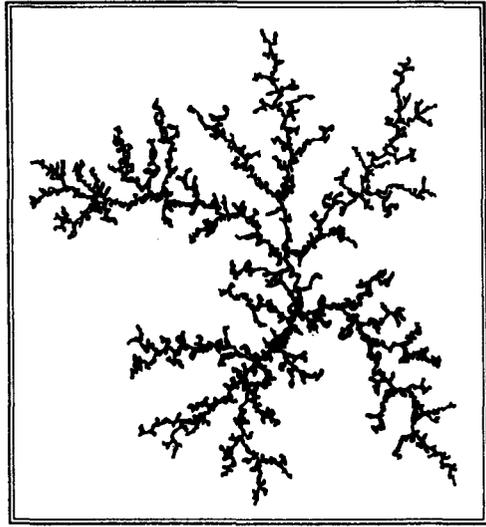
Фрактальная математика

Обсуждая пространственную вариабельность свойств почвы, отвечающих за перенос вещества, можно создать модель почвенной неоднородности и включить эту модель в существующие теории массопереноса. Возможен и другой путь разработки теории массопереноса - начать все сначала и предложить новую теорию, где одним из условий будет неоднородность почвы. В любом случае мы создаем концептуальную модель пространственной неоднородности свойств почвы. Один вариант реализации модели заключается в предположении о случайности процессов, определяющих пространственную организацию почвенной массы, т.е. вероятностный характер создающих ее процессов. Например, гидравлическая проводимость почвы может быть смоделирована как поле случайных величин с логнормальным вероятностным распределением. Далее мы можем изучать статистические закономерности распределения гидравлических свойств почв и находить способы включения неопределенностей в модели переноса. В этом случае возникает проблема зависимости средних величин и дисперсии от конкретных локальных факторов. Следовательно, модели переноса для небольших участков оказываются непригодными для прогнозов на обширных территориях.

Для описания комплексной пространственной вариабельности природных систем создан новый мощный раздел геометрии - *фрактальная геометрия*. Он может применяться при изучении облаков, почв, форм рельефа, морских побережий, водоносных горизонтов. Многие природные системы обнаруживают высокую вариабельность по всей своей протяженности. Традиционная геостатистика способна обрабатывать свойства почвы, неоднородные на одном уровне организации и кажущиеся однородными на более высоком уровне. Во фрактальной геометрии разработаны методы количественного описания пространственной вариабельности независимо от масштаба исследования. Так, эти методы могут быть использованы для развития более общих прогнозных моделей переноса в пространственно неоднородных почвах при любой степени детальности (уровне организации почвенной массы).

Изучение возможностей применения *фрактальной геометрии* для анализа пространственной вариабельности почв находится на самом раннем этапе. Фрактальные модели порового пространства и распределе-

ния частиц разных размеров недавно были апробированы на определении вододерживающей способности и переноса воды в неоднородных почвах. Тем не менее, остро ощущается необходимость измерений других фрактальных свойств почв, что должно породить новый взгляд на методологию их изучения. Если пространственное варьирование какого-либо почвенного свойства фрактально по самой своей природе, методы традиционной статистики непригодны для его описания. Например, средние показатели и дисперсия многих свойств почвы зависят от размеров обследуемой территории. Чтобы учитывать подобные обстоятельства, необходима разработка новых статистических методов, оперирующих с фрактальной природой почвенных свойств.



Фрактальная картина радиального растекания жидкости в пористой среде

Мы должны также выяснить, каким образом можно включать природу фрактальной неоднородности в физические модели. Главная трудность в этом смысле заключена в том, что почти все фрактальные методы основываются на простых геометрических конструкциях, они не принимают во внимание те сложнейшие взаимоотношения компонентов, которые и приводят к созданию той или иной геометрической формы. Актуальная задача состоит сейчас в том, чтобы найти способы описания физической сущности переноса в неоднородных почвенных средах с их фрактальными свойствами, другими словами, мы должны разобраться в сущности физических явлений, лежащих в основе фрактальной математики. Фрактальные распределения могут быть непосредственно связаны с минимизацией рассеяния энергии, так, возможным примером этого служит языковатость проникновения водного потока в почву.

Стохастические потоки

Недавние успехи "чистой" физики в области нелинейной динамики могут быть с успехом использованы в физике почв. Нелинейная динамика представляет собой исследование меняющихся во времени систем, которые обнаруживают хаотическое поведение (например, чрезвычайно сильная зависимость эволюции системы во времени от начальных условий). Многими сейчас признается, что поведение системы в физическом смысле, рассматривавшееся раньше как чисто случайное, на самом деле является детерминистским и обнаруживающим черты хаотического поведения вследствие очень сильной зависимости от начальных условий. Очень сильная зависимость от начальных условий означает, что даже незначительные изменения в поведении на ранних этапах сильно скажутся на поведении системы в будущем. С точки зрения построения прогнозной модели весьма опасны ошибки в оценках или измерениях на ранних стадиях, поскольку они обернутся значительными отклонениями от прогнозного варианта. Другими словами, наши возможности надежного прогнозирования поведения хаотических систем весьма невелики и мало зависят от объема знаний об исходном состоянии системы. Обычно такие системы описываются парами нелинейных дифференциальных уравнений. Нелинейные обратные связи между уравнениями во многом определяют высокую степень зависимости от начальных условий.

Очень важно знать, имеет ли перенос влаги и химических соединений в почвах хаотический характер. Водный поток в не полностью водонасыщенной почве описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных и, поэтому может иметь вероятностный характер. Вероятно, таковы и водные потоки в почвенных макропорах, почвенных и породных трещинах. Так, на начальном этапе просачивания воды в сухую почвенную макропору водопроницаемость ее стенок минимальна. Следовательно, количество воды в макропоре будет увеличиваться, что, в свою очередь, вызовет возрастание водопроницаемости стенок. Увеличение проницаемости способствует ускорению оттока воды из поры, что вновь понижает водопроницаемость стенок и замедляет движения водного потока с соответствующим возрастанием количества воды в поре. Накопление воды опять способствует ее лучшему оттоку. Такой попеременный процесс насыщения - разгрузки высоко нелинейный и представляет собой яркий пример ответных реакций, приводящих систему в хаотическое состояние.