

## РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ МИКРОМОРФОЛОГИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭДАФОТОПОВ СТЕПНОЙ ЗОНЫ УКРАИНЫ

Н.А. Белова, О.К. Балалаев

*Дніпропетровський національний університет*

### РОЗВИТОК КОМП'ЮТЕРНИХ МЕТОДІВ В ЕКОЛОГІЧНІЙ МІКРОМОРФОЛОГІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЕДАФОТОПІВ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Проведено огляд існуючих ефективних методів одержання та аналізу оцифрованих зображень шліфів непорушених ґрунтів. Розглянуто історію розвитку екологічної мікроморфології едафотопів, сучасний рівень застосування комп'ютерних технологій цього наукового напрямку і можливі шляхи його подальшого розвитку.

*Ключові слова:* екологічна мікроморфологія, оптичний мікроскоп, сканер, цифрова фотокамера, мікроморфометрія, ґрунтовий шліф, комп'ютерна програма.

N.A. Belova, A.K. Balalayev

*Dnipropetrovsk National University*

### COMPUTER METHODS IN ECOLOGICAL MICROMORPHOLOGY AT RESEARCH SOILS OF A STEPPE ZONE OF UKRAINE

The browse of existing effective methods of obtaining and analysis of the digitized images of undisturbed soil microsections is given. The history of soil ecological micromorphology is considered. The modern level of computer technologies in this scientific direction is shown. The possible paths of further development are indicated.

*Key words:* ecological micromorphology, light microscope, scanner, digital camera, micromorphometry, soil microsection, computer program.

### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

Почвоведы достаточно давно рассматривали почву как экологическое явление (Раменский, 1938). Это и неудивительно, если оценивать почву с научных концепций, выдвинутых В.В. Докучаевым (1883). Развивая эти концепции, В.Н. Сукачев (1964) предложил учение о биогеоценозе, отмечая, что поверхность Земли есть место контакта и взаимодействия горных пород (литосферы) и воздуха (атмосферы), а также воды (гидросферы), в результате чего образуется своеобразный слой как следствие взаимодействия этих «сфер» — почва (педосфера), которая, в свою очередь, взаимодействует с прочими «сферами».

Такой процесс имел место в появлении и дальнейшей эволюции лесов, лугов, степей, сфагновых болот и других типов растительности. В.Н. Сукачев считал, что наиболее рационально именовать этот процесс филоценогенезом. Совершенно особое место в нем занимает почва. Она суммирует в себе результаты сложного биогеоценотического процесса и представляет собой наглядное и наиболее полное выражение итогов деятельности этих процессов. В ходе филоценогенеза почва сопряженно развивается с комплексом других факторов почвообразования. В связи с этим в каждой почве сочетаются признаки экологические, ценогенетические (филоценогические, зоологические, микробиологические и др.), а также сохраняется ряд реликтовых черт, которые могут оказать существенную помощь в установлении типа почвообразования.

В науку под названием «Почвенная экология» необходимо вкладывать два понятия (Раменский, 1938): экология почвы как среды жизни, населяющих её организмов (растения, животные, бактерии); экология почвообразовательных процессов, связь её со средой обитания. Содержанием экологии почв должно быть изучение закономерных соотношений между почвой и средой её формирования в их взаимодействии и развитии (Волобуев, 1963). Л.О. Карпачевский (1994) рассматривает структурно-функциональную роль почвы как компонента биогеоценотической системы. Для характеристики средообразующего влияния растений в биогеоценозе этот автор вводит понятие биогеоценотического поля и поддерживает идеи Л.Г. Раменского о двух типах свойств почвенного покрова: ценогенетических (экологических) и реликтовых (палингенетических), отражающих происхождение почвы и историю её развития.

© Белова Н.А., Балалаев А. К., 2003

Микроморфология почв – особое направление в почвенной науке с устоявшимися методическими принципами и техническими средствами (Kubienna, 1953). Эта наука занимается изучением микрокомпонентов почв: минеральных, органических и микробиологических. Она зарекомендовала себя как эффективный метод исследования, диагностики и систематики почв. Экологическая микроморфология почв развивается Комплексной экспедицией ДНУ на протяжении четверти века (Белова, 1997; Белова, Травлеев, 1999). Исследуя микроморфологическое строение отдельных группировок частей почв, эколог-микроморфолог использует экологический подход к изучению почвы как компонентного тела биогеоценоза.

Почва – биокосное явление природы. Микроморфолог в прозрачных шлифах исследует скелет почвы, представленный зёрнами первичных минералов крупно-пылеватых и песчаных фракций (Парфенова, Ярилова, 1977; Handbook for Soil ..., 1985). Соотношение первичных и вторичных минералов свидетельствует о древности и зрелости почвообразования, которое является результатом воздействия экологических факторов и сложных биогеоценологических взаимодействий в процессионном блоке (в понимании И.П. Герасимова).

Плазма почвы представлена тонкодисперсным материалом, состоящим в основном из глинистых минералов и включающим, в зависимости от типа почв, разное количество оксидов железа, гумуса, карбонатов и мельчайших зёрен почвенного скелета. Изучая плазму в почвах лесных сообществ в степи, мы выявляем здесь четко выраженные элювиальные и иллювиальные горизонты, которые имеют конвергентную природу: морфологически напоминают проявление подзолистого процесса, хотя в действительности являются результатом лессиважа. Поведение плазменного материала свидетельствует об активности транзитных явлений в почвообразующих породах.

В прозрачных шлифах нами задокументированы факты передвижения тонких фракций почвы в байрачных чернозёмах без разрушения ферро-алюмо-силикатных ядер при нейтральной реакции почвенного раствора. Немаловажную роль играют пустоты – так называемые пространства между твёрдыми частицами, которые могут быть заполнены воздухом, газом, водой. Скелет, плазма (*S-matrix*) и пустоты составляют главные части микростроения почвы. Экологическое рассмотрение микроосновы лесной почвы позволяет выявить её прошлое и настоящее, прогнозировать дальнейший генезис и эволюцию. По существу, почвенная основа является тем фоном, на котором появляются новообразования, она вовлекается в процессы структурообразования и другие, даже противоположные структурообразованию, процессы.

Прямым следствием экологических процессов, протекающих в почвах, является образование агрегатов. Гумус, как правило, представлен органическими коллоидами, которые склеивают почвенные частицы. Известно, что структурные почвы – гумусные почвы, но гумусные почвы – не обязательно структурные. Вполне понятно, что без достаточного количества таких мощных коагуляторов, как кальций и магний, гумус не становится деятельным перегноем и не коагулирует необратимо.

Новообразования – это отложения веществ из солевых и коллоидных растворов и суспензий. При изучении почвы исследователь сталкивается с явлениями биогеохимических барьеров: геохимического, механического, биогеохимического, окислительного (восстановительного глеевого), восстановительного сероводородного, кислого, нейтрального, сульфатного, испарительного, сорбционного. Грунтовые воды, почвенные растворы растворяют различные химические соединения в почве, при этом грунтовые потоки, продвигаясь в толщах осадочных пород, содержащих определенное количество легкорастворимых солей, постепенно обогащаются этими солями. Однако растворение каждой соли соответствует произведению ее растворимости и концентрации насыщения. По мере растворения солей последовательно наступает насыщение почвенного раствора (или грунтовой воды) вначале бикарбонатами кальция и магния, затем сульфатами кальция, сульфатами натрия, хлоридами натрия и сульфатами магния.

С повышением температуры растворимость большинства минералов увеличивается. Так, например, растворимость  $\text{SiO}_2$  увеличивается с повышением температуры, поэтому для более глубоких зон земной коры характерны явления миграции и перекристаллизации  $\text{SiO}_2$  (гидротермальные растворы). Минералогические исследования показали,

что образование различных модификаций кремнезёма в почвах (опала, халцедона, кварца) часто имеет биогенный характер. После разложения растительных остатков опал поступает в почву, теряет воду, органоморфную структуру и постепенно превращается в халцедон, а затем и во вторичный кварц.

Из изложенного видно, какую бесценную информацию для анализа раскрывают перед нами эколого-микроморфологические исследования. Важным шагом вперед в понимании экологической сущности почвенных процессов и существенно облегчающую их алгоритмизацию явилась концепция почвенной матрицы (Зубкова, Карпачевский, 2001). Огромный материал, накопленный за десятки лет, нуждается в статистической обработке и построении на ее основе математических моделей почвенных процессов. Еще 10–15 лет назад такие задачи были трудно осуществимы, но сейчас мы имеем возможность использовать всю мощь современных компьютерных технологий при решении назревших микроморфометрических проблем. О необходимости использования количественных кодированных данных в памяти ЭВМ для идентификации почв, их диагностики и классификации говорилось и раньше (Ковда, 1973). Однако успех в осуществлении ранее высказанных идей напрямую зависит от прогресса в росте вычислительной мощности и объема памяти, сопровождающегося снижением стоимости персональных компьютеров.

Компьютерная микроморфометрия – относительно молодая и активно развивающаяся область во всем научном мире. Все работы по данной тематике в статье сложно перечислить, отметим лишь некоторые последние публикации, связанные с анализом почвенных изображений (Protz et al., 1992; Estimating ..., 2000; Балалаев, 2002).

#### СОВРЕМЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Компьютерных программ, предназначенных для анализа изображений, создано много. Достаточно войти в мировую Интернет-паутину и на поисковых серверах сделать поиск по ключевым словам, как обнаружатся сотни ссылок. Практически все ведущие фирмы-производители оптических микроскопов: немецкие «Леика» (<http://www.leica-microsystems.ru/>) и «Карл Цейс» (<http://www.zeiss.de/>), японские «Никон» (<http://www.nikon.com/>) и «Олимпус» (<http://www.olympus-global.com/>), австрийская «Микрос» (<http://www.micros-at.ru/>), российская «Ломо» (<http://www.lomo.ru/>) и многие другие предлагают в стандартной поставке или опционно специализированные пакеты программ. Эти программы созданы преимущественно для работы с микроскопами соответствующих фирм и имеют, как правило, узкую специализацию. То есть если оптический прибор создан, например, для металлографических целей, то к нему поставляется компьютерная программа для расчета специализированных характеристик, применяемых в металлургической области. К тому же для использования заявленных возможностей необходимо приобрести дорогостоящий микроскоп. Но часто бывает, как в нашем случае, микроскоп с хорошими оптическими характеристиками уже имеется в наличии, но в нём не предусмотрено сопряжение с компьютером. Как поступать в таких случаях?

Для решения этой проблемы существует много независимых фирм, занимающихся более или менее успешно созданием необходимого программного обеспечения. Их количество измеряется десятками, а перечень названий, интернет-адресов и кратких технических характеристик может занять не одну страницу текста. Спектр возможностей найденных программ широк – от примитивных до серьезных разработок ведущих софтверных фирм. Все они платные с ценовым диапазоном от 500 до 2500 долларов, но высокая стоимость – не единственный их недостаток. Каждая фирма для привлечения большего числа клиентов стремится создать универсальное программное обеспечение, которое подходило бы всем потенциальным пользователям. Но число компьютерных методов столь велико, а цели и задачи исследователей столь разнообразны, что идея удовлетворить потребности всех пользователей кажется нам утопической. Такие программные пакеты хорошо работают на производстве с его поточностью. Ученых же главным образом интересуют нестандартные подходы, поскольку именно они генерируют все новое и «двигают» научно-технический прогресс. Между тем почвенная микроморфология является той свободной нишей, которую разрабатываемая нами программа может достойно занять. К тому же, создавая и отлаживая программу самостоятельно, глубже понимаешь

сущность используемых математических методов и программных алгоритмов, что способствует возникновению новых идей.

Развитие вычислительной техники и аппаратуры сбора данных позволило перейти от старых методов визуальной оценки характеристик наблюдаемой в микроскоп картины к точным численным методам. Компьютерная обработка позволяет резко повысить точность анализа, а значит, поднять критерии оценки почвенных образцов. Система анализа изображений сейчас доступна практически любой почвенной лаборатории. При этом она может быть составлена из компонентов, уже имеющихся в наличии (оптический микроскоп и персональный компьютер) и требующих минимальных затрат на их сопряжение (цифровой фотоаппарат стоимостью приблизительно 400 долларов и (или) сканер со слайд-модулем стоимостью приблизительно 300 долларов, а программное обеспечение можно создать собственными силами с помощью штатного программиста).

Применение новых технологий начинается с ввода изображения в компьютер с помощью современного сканирующего устройства, которое за счет высокого оптического разрешения 2400 dpi и более позволяет достигать увеличения в 50 и более раз. Для многих микроморфологических задач такого увеличения вполне достаточно, и можно обойтись без оптического микроскопа, что существенно удешевляет исследования. При необходимости более детального изучения почвенного сложения или анализа в поляризованном свете без применения микроскопа и цифрового фотоаппарата не обойтись.

Далее через сканер или цифровую фотокамеру оцифрованное изображение передается в компьютер, оснащенный программным пакетом. Программы осуществляют захват изображения, запоминание, архивирование, математическую обработку, выполнение необходимых измерений. Они позволяют преобразовывать исходные изображения, количественно анализировать и выводить их на печать вместе с результатами расчетов. Используя программу, исследователь не только автоматизирует процесс анализа, но и повышает его точность.

Программа, написанная на современном объектно-ориентированном языке *Visual C++*, работает под управлением операционной системы *Microsoft Windows 95/98*. Алгоритмы и методы, на которых основана работа программы, изложены в литературных источниках (Прэтт, 1982; Павлидис, 1986; Роджерс, 1989; Castleman, 1979; Gonzalez, Wintz, 1987; Бондарев и др., 2001). Наглядное введение по данному вопросу можно просмотреть в сети Интернет (<http://www2.env.uea.ac.uk/gmmc/soilmicro/naples/naples.html>). Программа имеет дружественный многооконный интерфейс и модульную организацию, интегрированную среду и высокий уровень автоматизации. В основу программирования положен принцип расширяемости, то есть по мере появления новых методов анализа изображений они будут включены в программу с минимальными затратами временных ресурсов. Часть используемых модулей на сегодняшний день находятся на стадии разработки и отладки и будут подключены к основной программе в дальнейшем.

Принципиально весь программный код можно разделить на два больших блока:

1) бинаризация исходного полутонового изображения, поиск несвязанных объектов и вычисление их геометрических признаков с последующей статистической обработкой и получением усредненных характеристик;

2) преобразование исходного изображения – сегментация, оконтуривание, спектральный анализ и другие двумерные преобразования (без разделения на отдельные объекты) с целью вычисления интегральных признаков, характеризующих сразу все изображение.

Блоки, в свою очередь, состоят из нескольких модулей, которые отвечают за расчет какого-либо признака или группы сходных признаков. К признакам, вычисляемым в блоке 1, относятся: средние значения, дисперсии и квантили площади, периметра, длины, ширины, ориентации и различные коэффициенты формы найденных объектов (пор, агрегатов, минералов и т. д.). В блоке 2 рассчитываются яркостная и структурная энтропия, фрактальная размерность, текстурные признаки, а также строятся гистограммы, структурограмма и роза ориентации структурных элементов.

В дальнейшем, по мере накопления вычисленных структурных параметров, они вместе со сжатыми изображениями почвенных шлифов формируют базу данных и

записывают на магнитный или оптический носитель информации для возможности оценки временной динамики почвенного сложения.

Данный подход позволяет статистически достоверно оценить влияние на почвенную микроструктуру таких факторов, как глубина залегания, тип растительности, почвенная фауна, рельеф, обработка почвы и др. Описываемая технология хорошо зарекомендовала себя на практике. Особенно эта методика эффективна при сравнении двух и более изображений. Мы отдаем себе отчет в том, что потенциал рассматриваемых методов далеко не исчерпан, и постоянно совершенствуем методики изготовления почвенных шлифов, а также программное обеспечение для анализа их изображений.

### ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Будущее развитие эколого-микроморфологических исследований невозможно без последующего внедрения новых математических методов анализа почвенных изображений.

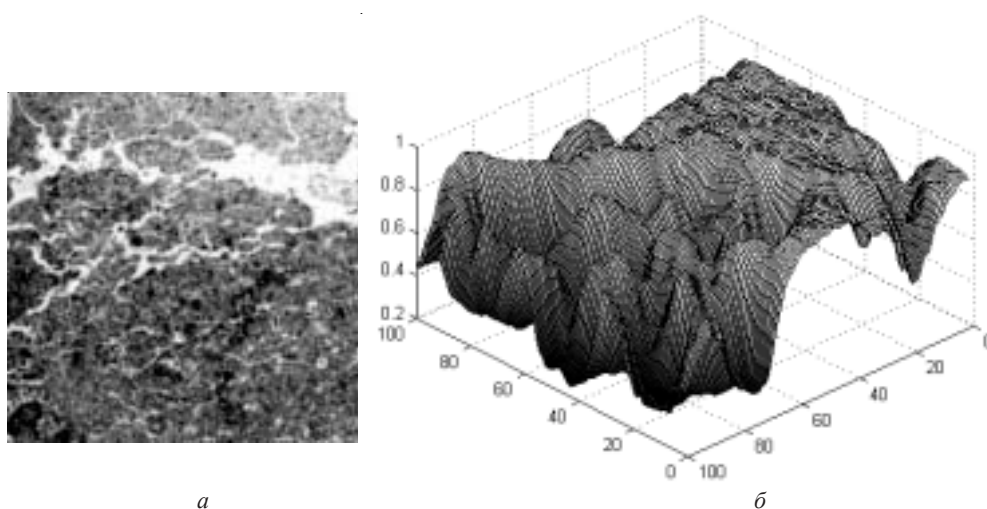
Перспективы развития видятся нам в двух направлениях:

- 1) совершенствование методик изготовления почвенных шлифов наряду с расширением используемых методов оптической микроскопии и широким внедрением растровой электронной микроскопии (РЭМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ);
- 2) разработка оптимизированных вычислительных алгоритмов и применение принципиально новых математических методов анализа информации, полученной в ходе микроморфологического эксперимента.

Рассмотрим указанные направления подробнее. Классические методики приготовления прозрачных ненарушенных почвенных шлифов прошли проверку временем. Тщательно приготовленный шлиф – своего рода произведение искусства, требующий от микроморфолога большого терпения и профессионализма. В высоком качестве и долговечности шлифов, изготовленных таким образом, можно не сомневаться. В целях сохранения приготовленных шлифов необходимо создание специализированной шлифотеки с подходящими условиями. Параллельно следует формировать электронную базу данных изображений почвенных шлифов на оптических *CD/DVD*-носителях. Однако в некоторых случаях высоким качеством можно пожертвовать в угоду количеству и скорости. Так, при проведении обширных экологических мониторингов эдафотопов, кадастров земель и накоплении репрезентативного объема выборки классические методики изготовления почвенных шлифов существенно снижают оперативность работ. Стремительный прогресс в области компьютерных технологий и их повсеместное распространение требуют перемен. Точнее сказать, необходимо приспособлять традиционные методики под возможности современных компьютеров и их периферийных устройств. Сейчас трудно сказать, по какому пути пойдут эти изменения. Но можно с уверенностью утверждать, что найти удачные решения можно, только приняв на вооружение и глубоко осознав возможности современных компьютерных технологий.

Как бы тщательно ни был отполирован почвенный шлиф, на микроуровне он все равно имеет объемную структуру с множеством возвышенностей и впадин. Изменения рельефа поверхности при ныне принятом подходе воспринимаются как дефекты. С другой стороны, трехмерная поверхность несет в себе полезную дополнительную информацию (поверхностные признаки), которая скрыта в вертикальной  $z$ -компоненте. Наблюдение стереоскопического изображения потребует модернизации конструкции бинокулярного микроскопа. Для получения двух изображений, разнесенных на некоторое расстояние (стереобазис), возможно размещение двух миниатюрных цифровых видеокамер, которые крепятся вместо окуляров микроскопа. При таком подходе применение сканера в принципе невозможно, а для вычисления  $z$ -компоненты понадобится усложнение программного обеспечения и как минимум в два раза возрастут требования к объему компьютерной памяти. В результате совмещения обоих изображений вычисляется трехмерный поверхностный сигнал. Его примерный вид изображен на графике. Возможно, в целях изучения объемной поверхности почвенной ненарушенной структуры понадобится изменить способы шлифовки образца либо вообще отказаться от нее и готовить исследуемые образцы, используя совершенно иные принципы.

Другой способ получения дополнительной информации об объемной структуре почвенного образца, который может быть успешно внедрен в практику микроморфологических исследований, заключается в послойном шлифовании. Суть его состоит в следующем. С подготовленного к шлифованию почвенного образца последовательно снимают слои минимально возможной толщины. При этом после снятия очередного слоя гладкую поверхность образца сканируют (тем самым накапливается  $z$ -компонента), а изображение заносят в ЭВМ. Здесь возможна альтернатива – получение среза путем микротомирования. Современные дисковые микротомы с алмазными пилами позволяют разрезать самые прочные материалы (металлы, природные камни и т. д.) с толщиной среза 0,5–100 мкм. На компьютерную программу при этом возлагается нетривиальная задача совмещения двумерных изображений по характерным точкам и реконструкция объемной картины. Требования к объему памяти возрастают многократно. Сильно растут и время вычислений. Зато появляется возможность воссоздания реальной трехмерной микроструктуры почвенного образца. Важность подобной информации не вызывает сомнения, так как открываются новые перспективы развития экологической микроморфологии с точки зрения стереоэкологии в геометрическом смысле этого термина (Шанда, 2002).



**Изображение почвенного шлифа верхнего слоя чернозема лесозулучшенного (а) и фрагмент его трехмерной поверхности (б)**

Как бы странно в XXI веке это ни звучало, но нам еще предстоит научить программу расшифровывать полноцветные изображения. Они содержат в себе в 3 раза больше полезной информации ( $RGB$ -составляющие), чем черно-белые, и особенно полезны для анализа минерального состава эдафотопы в поляризованном свете. Особых сложностей в программировании здесь не возникает (Яншин, 1989; Шлихт, 1997), кроме трехкратного увеличения нагрузки на вычислительные ресурсы.

Ко второму перспективному направлению нашей деятельности относится оптимизация вычислительных алгоритмов при совершенствовании программного кода. Дело в том, что некоторые процедуры, заложенные в программе, требуют много машинного времени (от десятков минут до единиц часов) в зависимости от размера и сложности обрабатываемого изображения. Наряду с увеличением скоростных характеристик аппаратной части вычислительной платформы необходима серьезная оптимизация программного кода, чему до сих пор уделялось мало внимания.

Другими полезными свойствами, отсутствующими пока у программного пакета, являются гибкость и простота в использовании. Нужно добиться такого состояния, чтобы каждый пользователь программы, независимо от его профессиональных знаний, мог свободно добиться желаемого результата. Для этого необходимо введение системы

помощников или мастеров, интерактивной справки, контекстных меню и т. п., что значительно упрощает эксплуатацию программы. Возможность записи пользователем в виде методики последовательности обработки изображений и вывода результатов в виде отчета позволит облегчить проведение большого объема однотипных анализов. Полезным также будет встроенное *TWAIN*-сканирование, полная совместимость с сопутствующими *Windows*-приложениями, и возможно проведение некоторых измерений в соответствии с международными стандартами *ISO*, *ASTM*, *BSI*.

Дальнейшая автоматизация подсчетов и измерений, внедрение специализированных методов устранения дефектов пробоподготовки и хроматических аберраций объектива микроскопа, использование нейросетевого подхода, нечеткой логики, генетических алгоритмов и других современных направлений составляют далеко не полный перечень вероятных путей развития программы. Использование новейших технологий в перечисленных областях позволит вывести программный пакет на качественно новый уровень. Мы очень надеемся и прилагаем все усилия для того, чтобы наши планы реализовались в недалеком будущем.

### ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО

Кому еще может понадобиться компьютерная система анализа почвенных изображений? В принципе она найдет себе место везде, где специалисту приходится работать с микроскопическими объектами, которые надо изучать: измерять, считать, сравнивать и получать при этом достоверные результаты, особенно если их количество велико. Система анализа микроскопического изображения – это универсальный инструмент, делающий работу исследователя более эффективной, выгодной и комфортной.

Наш опыт показывает, что наступило время для широкого внедрения описываемых подходов в практическую работу. Почвенный экологический мониторинг, лесное хозяйство, сельскохозяйственное земледелие, строительство фундаментов зданий и дорог – вот далеко не полный перечень возможных областей применения компьютерной микроморфологии почв. Рассмотрим подробнее два примера. Допустим, что у агронома под рукой есть персональный компьютер (что в наше время не редкость), сканер и необходимое программное обеспечение. Тогда, изготовив почвенный шлиф, он может получить достоверную информацию о почвенной структуре, ее качестве и количестве. Наряду с использованием других почвенных анализов специалист может точнее подобрать агротехнику обработки участка земли и проанализировать последствия предыдущих сельскохозяйственных работ. Такой контроль особенно важен для длительного сохранения высокой агрегированности черноземов, а значит, для получения стабильно высоких урожаев. К тому же, проводя анализ на протяжении многих лет, с разных полей можно вычислить развитие либо деградацию агрономически ценных качеств почвы в зависимости от применяемых сельскохозяйственных мероприятий на том или ином поле. Такой контроль в долгосрочном плане даст экономический эффект, который окупит материальные затраты на оборудование.

Знание и учет особенностей микроструктуры глинистых пород является непременным условием при проектировании инженерных сооружений, зданий, дорог и др. Строители знают, что неверная оценка этих особенностей может привести к непредсказуемому поведению специфических пород и вызвать катастрофические разрушения (Грунтоведение ..., 1983). Ярким примером строительной ошибки является всем известная Пизанская башня. В нашем регионе широко распространены лёссовые породы, которые сильно уплотняются при смачивании их водой под действием собственного веса или внешней нагрузки. В строительной науке существует много способов борьбы с просадкой лёссов. Какой бы метод ни применялся на конкретной строительной площадке, необходим контроль за уплотнением грунта и почвы. Тогда приходят на помощь рассмотренные выше методы.

В заключение хотелось бы отметить, что описанные в статье методы применяются нами в оптической микроскопии. Другими и далеко не единственными способами изучения поверхности почвенной микроструктуры с гораздо большим увеличением является растровая электронная микроскопия (Растровая ..., 1984) и сканирующая туннельная микроскопия (Лифшиц, 2001). Использование этих методов, по существу, переводит наши

исследования на наноуровень. При всех несомненных достоинствах методы РЭМ и СТМ обладают существенными недостатками – сложностью подготовки образца и высокой стоимостью оборудования. Указанные недостатки не позволяют широко внедрять в практику почвенных исследований методы РЭМ и СТМ. При этом для анализа изображений, полученных с электронного или туннельного микроскопа, применяются те же математические и статистические принципы анализа с использованием ЭВМ. Существенная разница состоит лишь в выводах, которые делают исследователи, основываясь на вычисленных геометрических и структурных характеристиках почвенных образцов. В почвенной микроструктуре находят свое отражение процессы различного масштаба и различной природы. Мы планируем детальное рассмотрение затронутых вопросов в наших дальнейших исследованиях.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Балалаев А.К. Опыт применения компьютерных технологий в морфометрических исследованиях почвенных микрошлифов // Грунтознавство. – 2002. – Т. 2, № 1-2. – С. 88-69.
- Белова Н.А. Экология, микрофология, антропогенез лесных почв степной зоны Украины. – Д.: Изд-во ДГУ, 1997. – 264 с.
- Белова Н.А., Травлев А.П. Естественные леса и степные почвы. – Д.: Изд-во ДГУ, 1999. – 348 с.
- Бондарев В.Н., Трёстер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Х.: Конус, 2001. – 398 с.
- Волобуев В.Р. Экология почв. – Баку: Изд-во АН АзССР, 1963. – 250 с.
- Грунтоведение / Под ред Е.М. Сергеева. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 389 с.
- Докучаев В.В. Русский чернозём. – С.-Пб., 1883. – 458 с.
- Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. – М.: Русаки, 2001. – 296 с.
- Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. – М.: МГУ, 1994. – 189 с.
- Ковда В.А. Основы учения о почвах: В 2 т. – М.: Наука, 1973. – Т. 1. – 432 с.
- Лифшиц В.Г. Современные приложения сканирующей туннельной микроскопии для анализа и модификации поверхности // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 5. – С. 110-116.
- Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 399 с.
- Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. – М.: Наука, 1977. – 197 с.
- Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – 790 с.
- Раменский Л.Г. Почвенно-геоботаническое исследование земель. – М.: Изд-во колх. и совх. лит., 1938. – 610 с.
- Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн, Ньюбери, П. Эчлин и др. – М.: Мир, 1984. – 303 с.
- Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. – М.: Мир, 1989. – 342 с.
- Сукачев В.Н. Основы лесной биогеоценологии. – М.: Наука, 1964. – 564 с.
- Шанда В.І. Стереоекологія: обриси і проблематика // Екологія та ноосферологія. – 2002. – Т. 11, № 1-2. – С. 20-24.
- Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: Эком, 1997. – 298 с.
- Яншин В. Обработка изображений на языке Си для IBM PC. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
- Castleman K.R. Digital Image Processing. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. – 246 p.
- Estimating Earthworm-Influenced Soil Structure by Morphometric Image Analysis / A.J. Vanden Bygaart, C.A. Fox, D.J. Fallow, R. Protz // Soil Sci Soc. Am J. – 2000. – Vol. 64. – P. 982-988.
- Gonzalez R.C., Wintz P. Digital Image Processing. Addison-Wesley. Reading. – Massachusetts, 1987. – 307 p.
- Handbook for Soil Thin Section Description / P. Bullock, N. Fedoroff, A. Jongerius et al. – Wolverhampton: Waine Research, 1985. – 152 p.
- Kubiens W.L. The soils of Europe. – London: Thomas Murby, 1953. – 298 p.
- Protz R, Sweeney S.J. and Fox C.A. An application of spectral image analysis to soil micromorphology. I: Methods of analysis // Geoderma. – 1992. – Vol. 53. – P. 275-288.

*Надійшла до редколегії 14.10.03*