

## Нанотехнологии в почве

© 2009. Т.А. Зубкова, д.б.н., ведущий научный сотрудник;  
Л.О. Карпачевский, д.б.н., профессор  
МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения,  
e-mail: zubkova@soil.msu.ru

Показано, что образовалась новая область почвоведения – молекулярное почвоведение, связанное с изучением почвенных ксенообъектов, к которым относятся частицы, составляющие коллоидную фракцию, микроорганизмы, почвенная матрица.

It is shown that a new branch of Soil Studies has been developed – Molecular Soil Studies. This branch deals with soil xeno-objects, such as particles that constitute colloidal fraction, microorganisms, soil matrix.

Ключевые слова: наноструктуры, нанобъекты, почвенная матрица, организация микроорганизмов

### Нанотехнологии

Нанотехнология — это область знания, ориентированная на изучение материалов, а также методов и приёмов, обеспечивающих возможность создавать и модифицировать объекты из компонентов с размерами частиц менее 100 нм. Размер объектов, с которыми имеют дело нанотехнологи, лежит в диапазоне от 0,1 до 100 нм. Нанометр (нм) очень и очень мал. Большинство атомов имеют диаметр от 0,1 до 0,2 нм, а толщина нитей ДНК – около 2 нм. Диаметр эритроцитов – 7000 нм, а толщина человеческого волоса – 80 000 нм. Нанобъекты встречаются во многих природных телах. Так, в наших почвах размеры частиц колеблются от нескольких млн. нм до 2 – 1 тыс. нм и меньше 100 нм. Следовательно, в почвах есть наночастицы с особыми свойствами.

Объектами нанотехнологий могут быть макроскопические тела, атомарная структура которых создаётся и контролируется с разрешением на уровне отдельных атомов. К наночастицам и нанопорошкам относят объекты, в которых три характеристических размера находятся в диапазоне до 100 нм. Нанотрубки и нановолокна имеют размеры в диапазоне до 100 нм, а у наноплёнок хотя бы один характеристический размер должен находиться в диапазоне до 100 нм.

Почему такое ошеломляющее внимание к таким мелким частицам, в чём загадка и в чём их возможности? Когда-то Демокрит, а за ним и Лукреций высказали мысль, что наименьшее количество данного вещества –

атом, неделимый. Но наименьшее количество вещества – скорее, его молекула. И вот, оказалось, что молекула или группа молекул вещества могут иметь совершенно иные свойства по сравнению с самим веществом. Стало ясно, что наблюдается зависимость свойств объекта от размеров наночастиц. Причина этому – квантовые эффекты и эффекты межмолекулярных взаимодействий, такие как Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия, которые проявляются в средах с наночастицами. Например, ионизация атомов, флуоресценция, энергия отрыва валентного электрона, электропроводимость, адсорбционные и каталитические свойства зависят не только от заряда атомного ядра и положения электрона в атоме, а также и от размера наночастиц.

Разнообразие свойств среди нанобъектов одного и того же вещества связано со способностью этих частиц самоорганизовываться. Поэтому один из важнейших вопросов, стоящих перед нанотехнологией — как заставить молекулы группироваться определённым способом, чтобы в итоге получить новые материалы или устройства.

### Наноконструкторы в природе

В природе действительно существуют подобные системы и осуществляются подобные процессы. Так, известны биополимеры, способные организовываться в особые структуры. Один из примеров — белки, которые не только могут сворачиваться в глобулярную форму, но и образовывать

комплексы — структуры, включающие несколько молекул протеинов (белков).

Мы сами состоим из устройств, которые прекрасно научились работать с нанообъектами. Это наши клетки — кирпичики, из которых состоит наш организм. Клетка всю свою жизнь работает с нанообъектами, собирая из различных атомов молекулы сложных веществ. Собрав эти молекулы, клетка размещает их в различных частях — одни оказываются в ядре, другие — в цитоплазме, а третьи — в мембране.

В абиотической среде также существуют наноконструкторы, которые руководят процессами роста кристаллов, когда из атомов и молекул образуется целый минерал определенной, характерной именно для него формы. Человек ещё не овладел нанотехнологиями, которыми владеет каждая клетка человека, однако выращивать кристаллы с заданными свойствами уже научился (искусственные кристаллы для лазеров, ювелирных изделий и др.).

А что же почва? Почва — это биокосная природная среда, где живое и неживое сосуществуют нераздельно. Почва — это тоже нанореактор, и в ней осуществляются механизмы, воссоздать которые мы пока не можем, но вправе их распознать для того, чтобы управлять и манипулировать свойствами почвы.

### Наноустройства в почве

В почве также существуют нанообъекты. Это, в первую очередь, мельчайшие элементарные частицы, которые составляют коллоидную фракцию гранулометрического состава по-

чвы. В разных почвах их содержится разное количество — от 1 до 40 и более процентов от массы почвы.

К нанообъектам можно отнести и микроорганизмы, правда, их размеры намного больше 100 нм. Меньшие размеры имеют вирусы, но об их распространении в почве пока ещё мало информации (где-то на уровне 10000 вирусных частиц в одном грамме почвы). Главный нанообъект в почве — почвенная матрица, с ней связана работа всех почвенных нанореакторов [1, 2]. Матрица относится к наноплёнкам, поскольку имеет толщину в несколько нанометров, хотя общая площадь матрицы может превышать наноразмеры. Матрица представляет поверхность твёрдых частиц, по химическому составу она может быть минеральной, органической и органо-минеральной, а также и биологической, когда речь идёт о поверхности микроорганизмов. Матрица неоднородна, выделяются активные элементы — это центры различной природы (кислотные, основные). Активные центры различаются также и по «силе» — энергии связи с другими соединениями. Энергетическое поле активных центров распространяется на расстояния в несколько десятков нанометров от геометрической поверхности (СВВ1С1 — матрица, ВВ1 — геометрическая поверхность матрицы, ВАА1В1 — зона влияния матрицы на рис. 1) и таким образом расширяет зону влияния матрицы (рис. 1).

### Формирование агрегатной структуры

Одним из нанотехнологических процессов, созданных самой почвой, можно считать образование почвенной структуры. О механизмах

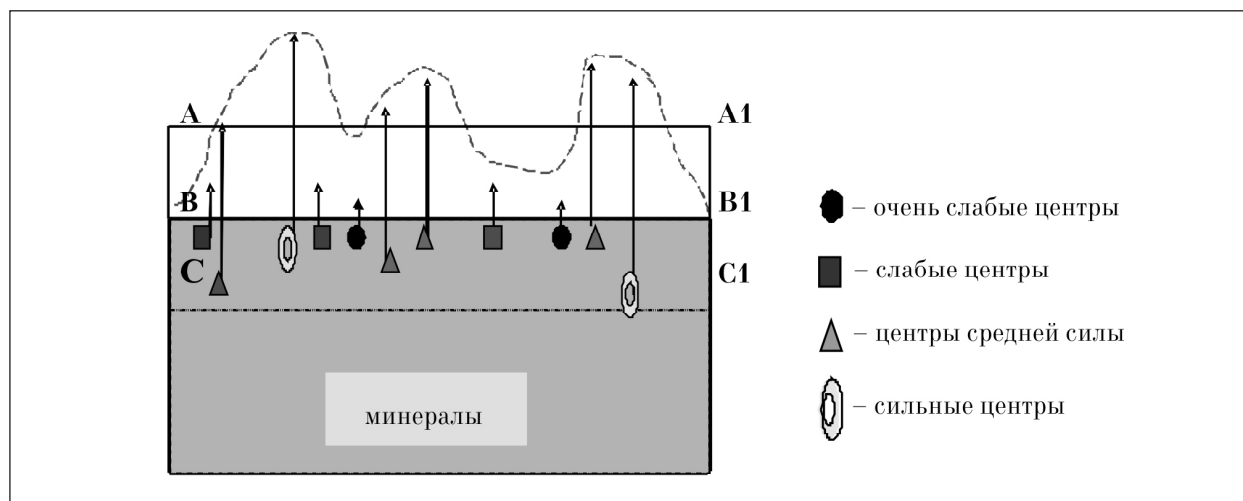


Рис.1. Схема дальнего действия энергетически неоднородных активных центров минеральной поверхности (пояснения в тексте)

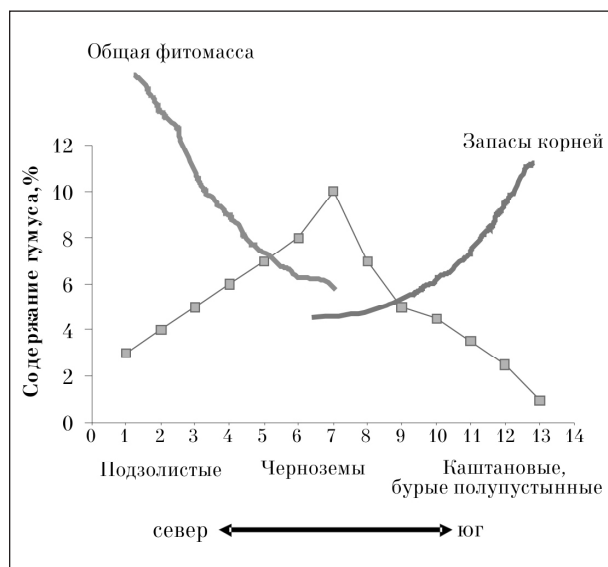


Рис.2. Распределение фитомассы, запаса корней и гумуса в экосистемах Европейской части России (по Л.О. Карпачевскому, 2005)

формирования агрегатов известно много [3], однако до сих пор не удаётся их синтезировать. Это означает одно: человек ещё не овладел природными нанотехнологиями по образованию агрегатов. Правда, внесение в почву небольших доз производных акриловой кислоты способствовало формированию почвенных агрегатов, но это единственный пример искусственного создания почвенной структуры. Подтверждение этому – почвогрунты или газонные смеси, которые после первого дождя размываются. Показано, что именно поверхностные свойства отвечают за формирование контактов и прочностных свойств агрегатов, а не химический состав частиц [4].

**Организация органического вещества в гумусе.** Это работа другого наноконструктора в почве, хотя в основе его опять лежит матрица, сначала исходная минеральная, а потом уже и сама органоминеральная. Разберёмся в этом процессе подробнее. О том, что гумус в почве – не просто набор или смесь органических соединений, а целостная система, система органических веществ по М.И. Дергачёвой [4], говорит его относительная стабильность и компонентный состав. Во-первых, 35 – 45% от гумуса составляет негидролизующий остаток, который невозможно отделить от минеральных компонентов, причём он постоянен, независимо от зонального типа почв [5]. По убыванию прочности связи с минералами компоненты гумуса располагаются в ряд: гумин > гуминовые кислоты > фульвокислоты > водорастворимое органическое вещество, т. е. поддерживается определённая органи-

зация органических соединений. Гумус – не только стабильная, но и динамическая система, хотя участвует в обменных реакциях его незначительная часть. Фрагментарный обмен составляет 0,01 – 0,001% в год по А.Д. Фокину [6].

Как же образуется такая организованная система гумусовых веществ? Источники гумуса известны (растительные остатки и микроорганизмы), но кто готовит гумус в почве? Если главный поставщик органических компонентов в почву растительность, то где же связь содержания гумуса в почве с фитомассой? Её нет (рис. 2). Также не обнаружено влияния и массы корней различного диаметра [7]. С организмами тоже странные «штучки» наблюдаются. Так, максимальная активность организмов отмечается в подстилке, но чем мощнее подстилка, а значит, и больше организмов в ней, тем меньше образуется гумуса в почве.

Переработка органического вещества, поступающего в почву, осуществляется ферментами как внутри организмов, так и внеклеточными. При этом все обнаруженные в почвах внеклеточные ферменты работают на разложение органических субстратов. Имобилизованные ферменты, способствующие синтезу полимеров, в почве пока не найдены. Но в почве работают и абиотические катализаторы, в частности, глинистые минералы, которых «хоть отбавляй». Долгое время внимание уделялось организмам и ферментам и недооценивалась роль минеральных катализаторов в почве. А ведь в их присутствии, т. е. на поверхности, происходят процессы, приводящие к укрупнению органических молекул. В отсутствии же минералов процессы не идут, хотя есть реагирующие компоненты, и микроорганизмы присутствуют. Внутри микроорганизмов не найдено высокомолекулярных компонентов гуминовых кислот, т. е. они не могут синтезировать гумус и накапливать его в почве. Выходит, что минеральная матрица служит плацдармом для формирования гумусоподобных веществ, гумусовых полимеров и контролирует этот процесс.

Таким образом, биохимическая схема показывает, что микроорганизмы переводят органические вещества в разные формы, создавая предгумусовые компоненты, а сам гумус – процесс физико-химический и контролируется минеральной матрицей почв.

**Организация микроорганизмов** в почве происходит по нескольким параметрам: по структуре, по функциональным особен-

ностям микроорганизма, морфологическим свойствам и др. Главный организатор микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности в почве – это почвенная матрица, на которой все они закрепляются с разной силой. Свободно «плавающих» и «летающих» в почве почти нет, ведь она часто пересыхает (следовательно, раствора нет) или, напротив, обводнена (значит, воздуха нет). Причем адгезия клеток бывает необратимая [8]. А раз они закреплены на матрице, то возникает вопрос: они по собственному желанию связываются с почвенными частицами, или по необходимости. И кто их принуждает? Матрица? Значит, она руководит адгезией микроорганизмов и иммобилизацией ферментов и создаёт мозаичную структуру их распределения в пространстве.

**Организация опада в подстилке** – это следующий природный конструктор, и проявляется он в формировании последовательности горизонтов (O1, O2, O3), которые связаны между собой функционированием и являются «фабрикой» гумуса.

Таким образом, в почве существуют нанотехнологические процессы, которые создала сама природа (образование агрегатов, гумуса, подстилки и др.), и задача человека расшифровать их таким образом, чтобы можно было не только манипулировать свойствами почвы, но и создавать искусственные почвы. Частично эти процессы под контролем. Так, например, капельное орошение, при котором контролируется содержание и доступность растениям воды.

Итак, образовалась новая область почвоведения – молекулярное почвоведение, которое изучает почвенные нанобъекты, а также реакции, процессы, механизмы [9]. Другая задача молекулярного почвоведения – установление мостов между миром микрочастиц и макросвойствами почвы, ведь между ними разница в  $10^9$  раз.

В почвоведении используется феноменологический подход, основанный на эмпирических данных, который допускает констатацию связей путём «есть связь – нет связи». Однако передача информации с молекулярного уровня на макроуровень имеет свои допущения и запреты, основанные на фундаментальных закономерностях строения тела. Ещё в 60-е годы прошлого века физики доказали, что прочность пористого твёрдого тела зависит от двух параметров – это число контактов между

частицами и средней силы единичного контакта [10]. Использование этих достижений в почвоведении показало, что механическая прочность агрегатов, как аналогов твёрдых пористых тел, пропорциональна числу контактов. А они определяются структурными параметрами: общая пористость агрегата, размер и форма пор, площадь удельной поверхности, гранулометрический состав почвы [1]. Это означает, что не отдельные молекулы, а взаимодействия между молекулами во многом определяют свойства почвенного макротела (агрегата). То есть нанобъекты, организовываясь определённым способом, создают разнообразие структурных особенностей в почвах.

Итак, в почве пока существуют нанотехнологии только природного происхождения. Человек лишь частично овладел некоторыми элементарными механизмами и использует их на практике (капельное орошение, мелиорация солонцов, известкование почв). Поэтому молекулярное почвоведение или нанопочвоведение – это широкое поле для исследований.

## Литература

1. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 296 с.
2. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Экологические функции почвенной матрицы // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2004. № 1. С. 30-37.
3. Гумматов Н.Г., Пачепский Я.А. Современные представления о структуре почв и структурообразовании. Механизмы и модели. Пущино. 1991. 32 с.
4. Дергачева М.И. Система гумусовых веществ почв. Новосибирск: Наука, 1989. 110 с.
5. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 222 с.
6. Фокин А.Д. Участие различных соединений растительных остатков в формировании и обновлении гумусовых веществ почвы // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 60-65.
7. Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.
8. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987. 256 с.
9. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А. Молекулярное почвоведение // Жизнь и безопасность. 2004. № 2-3а. С. 68-87.
10. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д., Марголис Л.Я. О механической прочности пористых дисперсных тел. Докл. АН СССР. 1964. Т.154. № 3. С. 695-698.