

Метод техногенной магнитной метки для изучения процессов массопереноса в почвенном покрове и эрозионно-руслowych системах

Р.Г. Ковач, С.С. Чернянский, А.Н. Геннадиев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

Method of technogenic magnetic tracer for study of matter transport in soil cover and fluvial systems

R.G. Kovach, S.S. Chenyanskiy, A.N. Gennadiev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

A variety of substances have found an application as tracers of matter transport in soil cover and fluvial systems. Magnetic spherules (MS) of the fly ash proved to have significant potential in this context and offer a number of advantages such as simplicity of extraction from soil or sediment, sustainability in most soil and aquatic environments, comparability in size with the most erodible soil particles, etc. We have experimented with quantification of soil erosion, mixing and sedimentation processes by using MS as a tracer. Small catchments, burial mounds, floodplains, artificial embankments, strongly polluted areas of industrial zones have been studied within the Central and Central-Chernozemic Russia, Mid-Western USA and some other parts of the world (15 key sites in total, more than 1000 soil and sediment samples). Special attention has been given to assessing the role of vegetation, topography and land use in MS accretion by soil cover. Lateral variety of MS supplies has been estimated on the example of cultivated and forested soils of various types in order to define statistically correct strategy of sampling. The data obtained enable to consider the method of technogenic magnetic tracer as holding much promise for evaluating a broad spectrum of processes of soil matter transport. Therefore it is practical to use MS as tracers for various processes studied. It is for example soil erosion in agricultural land use and estimate of industrial object's influence on nature systems.

Открытость – неотъемлемое свойство всех природных систем, включая почвенный покров и эрозионно-руслowych системы (ЭРС). При этом связь между различными системами осуществляется посредством перемещения вещества.

Частным случаем перемещения вещества в природной среде является перераспределение почвенного и иного минерального мелкозема. Практически все специалисты, занимающиеся изучением наземных природных и природно-антропогенных систем, в той или иной мере сталкиваются с необходимостью его качественной и количественной оценки. В тех случаях, когда для решения научных и практических задач необходимо изучение относительно медленных процессов, сопровождаемых перемещением вещества (например, в случае плоскостной эрозии почв), стандартные подходы требуют многолетних непрерывных наблюдений.

Ковач Р.Г., Чернянский С.С., Геннадиев А.Н. // Изменения природной среды на рубеже тысячелетий. Труды Международной электронной конференции. Тбилиси-Москва, 2006, с. 213-219. www.cetm.narod.ru/pdf/kovach.pdf

Более эффективный метод диагностики таких процессов – наблюдение за миграцией какого-либо трассера, метки, которая переносится вместе с мелкоземом, но при этом генетически не является его частью. К подобным меткам предъявляются следующие требования:

- простота количественной диагностики;
- физико-химическая устойчивость в почве;
- определенность условий поступления в почву;
- предсказуемость поведения в почве.

К настоящему времени накоплен определенный положительный опыт использования в качестве трассеров таких компонентов почв, как природные и техногенные радионуклиды, оксиды редкоземельных металлов, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), хлориды и другие соли (Геннадиев и др., 2004б; Голосов, 2000; Иванова и др., 2000). Весьма перспективным представляется использование для подобных исследований сферических магнитных частиц (СМЧ).

На основании литературных данных и собственных исследований мы можем сформулировать следующие преимущества данного метода:

- 1) хронологическая глубина (для Европейской части РФ – порядка 120-150 лет);
- 2) невысокая себестоимость опыта;
- 3) географическая универсальность;
- 4) возможность визуального наблюдения маркирующего компонента;
- 5) химическая инертность маркирующего компонента (Бабанин и др., 1995);
- 6) сопоставимость характерных размеров маркера (1-50 мкм) и почвенных микроагрегатов, движение которых маркируется;
- 7) относительно равномерное выпадение маркера на поверхность почвы.

Сферические магнитные частицы внешне выглядят как шарики диаметром от 1 мкм до 1000 мкм (Бабанин и др., 1995). Они состоят из сильномагнитных минералов (магнетит, маггемит, вюстит и др.), поэтому могут быть отделены от остального почвенного материала методами магнитной сепарации. Благодаря своим размерам, СМЧ хорошо различимы в поляризационный микроскоп. А особенности их морфологии позволяют довольно точно отличать их от природных магнетиков.

По своему происхождению СМЧ делятся на три группы. Первая, относительно немногочисленная, – это космогенные СМЧ, поступающие на Землю с космической пылью или в составе метеоритов. Магнитные сферулы второй группы образуются во время вулканических извержений. И последняя (самая на данный момент представительная) группа – антропогенные СМЧ. Они образуются при протекании практически любых высокотемпературных технологических процессов – металлургическое производство, сжигание твердых видов топлива (в том числе и в бытовых условиях), сварочные работы.

На поверхность почвы СМЧ попадают в составе атмосферной пыли. Если участок на своем протяжении имеет в целом сходные условия ее выпадения, то при практических исследованиях разницу в поступлении СМЧ на разном удалении участка от источника можно считать несущественной. В этом случае разница в запасах СМЧ в катенарно зависимых точках показывает перераспределение сферул и мелкозема в целом по склону.

Впервые СМЧ в качестве индикатора почвенных процессов стали использовать в США (Hussain et al., 1998; Jones, Olson, 1990). Затем после некоторого периода совместных российско-американских работ (Геннадиев и др., 2001а,б; 2002а, 2004а, 2005а; Gennadiev et al., 2002 а,б, Olson et al., 2002 а, б; 2003 а, б) метод техногенной магнитной метки (ТММ) стал применяться в России сотрудниками лаборатории углеродистых веществ биосферы кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (Геннадиев, Чернянский, 2003; Геннадиев и др., 2004в, 2005, Gennadiev et al., 2004). В последнее время лаборатория углеродистых веществ биосферы и лаборатория эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ совместно проводят сравнение маркирующих потенциалов радиоизотопов и СМЧ (Геннадиев и др., 2005).

Основные запасы СМЧ в целинных почвах сосредоточены (в зависимости от катенарного расположения) в верхних 5-20 см почвенного профиля. Распашка приводит к перемешиванию почвы в пределах пахотного слоя, поэтому на освоенных территориях имеет смысл отбирать смешанный образец со всей глубины вспашки. Таким образом, полевой пробоотбор достаточно вести на небольших глубинах. А небольшие объемы почвы, идущей в анализ (в среднем порядка 5-7 г на одно определение), позволяют работать даже на засеянных полях, не нанося существенного ущерба посевам.

Исследования, проведенные авторами (Геннадиев и др., 2004в) на геоморфологически однородных выровненных участках (площадки пробоотбора при этом находились на вершине одного холма на расстоянии около 100 м друг от друга), показали: для достижения уровня значимости в 20 и 10 % количество точек пробоотбора n на залесенных почвах должно составлять $n=4$ и $n=13$ соответственно. Распашка приводит к выравниванию содержания СМЧ по профилю, но при этом значительно увеличивает коэффициент вариации K_v (определяемый как отношение стандартного отклонения к среднему значению) содержания СМЧ. В частности, содержание СМЧ в верхних 5 см дерново-подзолистой почвы на смежных лесном и пахотном участках характеризуется величиной K_v в 9 и 39 % соответственно. В связи с этим объем репрезентативной выборки на освоенных почвах возрастает до $n=7$ (уровень значимости 20%) и $n=32$ (10%).

Влияние относительно высоких уровней природного варьирования СМЧ в почвах на результаты исследования является основным существенным фактором, определяющим точность методики. По нашим данным, суммарный вклад природного варьирования СМЧ и аналитических погрешностей его определения характеризуется дисперсией $s^2=4$, лишь четверть которой является вкладом ошибок анализа. Таким образом, повышение точности определения может быть достигнуто, в том числе, и некоторым физическим усреднением проб при отборе. Нами практикуется заложение на каждом ключевом участке парных трансект, расположенных на расстоянии порядка 20 м друг от друга. В каждой точке отбор проб ведется из нескольких (обычно – трех) скважин, что также позволяет снизить влияние природного варьирования на результаты работ. В случае исследования почв относительно пологих склонов (с небольшой прогнозной интенсивностью эрозионных процессов) количество трансект может увеличиваться до четырех.

К настоящему времени нами опробовано два варианта лабораторного выделения и количественного учета СМЧ в образцах. Первый из них весьма прост и не требует никакого специального оборудования. Для его реализации необходимы только ступка с пестиком, сито с диаметром ячеей 1 мм и 53 мкм, аналитические весы, любой прибор для подогрева жидкости (электрическая плитка, микроволновая печь, лабораторные горелки), несколько магнитов разного размера, делительная воронка, предметные стекла, пластины лексана (бисфенол А поликарбонат) в качестве покровных стекол, микроскоп с увеличением порядка Ч160-600, а также минимальный набор лабораторной посуды (стаканы, колбы, фарфоровые чашки и т.п.). Из реактивов можно ограничиться использованием гипохлорита натрия. Так же необходимо относительно большое количество дистиллированной воды (порядка 1,5-2 л на образец). Определение делится на следующие этапы:

1. Подготовка пробы и взятие навески;
2. Диспергация образца:
 - а. Обработка гипохлоритом натрия с нагреванием;
 - б. Разделение взвеси и гипохлорита натрия путем отстаивания или центрифугирования;
3. Мокрое просеивание через мелкоячеистое сито (в нашем случае использовалось сито 0,053 мм);
4. Магнитная сепарация;
5. Окончательная отмывка магнитной фракции;
6. Взвешивание магнитной фракции и приготовление препарата;

7. Прямой подсчет содержания СМЧ в образце;
8. Расчетная часть.

В настоящее время нами применяется усовершенствованный вариант методики обработки проб и подсчета СМЧ, позволяющий при наличии некоторого специального оборудования (ультразвуковой диспергатор, цифровая микрофотокамера) и программного обеспечения существенно ускорить и упростить процедуру выделения магнитной фракции из образцов, а также снизить ошибку расчетной части.

Используя эти методики, нами было обработано около тысячи образцов катенарно сопряженных почв из разных регионов России и США (Геннадиев и др., 2001а,б; 2002а,б; 2004а,б,в; 2005 а,б; Геннадиев, Чернянский, 2003) (табл. 1).

Выявлен ряд закономерностей, позволяющих более точно использовать данный метод при оценке почвенной эрозии. Проведено сопоставление данных о почвенной эрозии, полученных с помощью метода ТММ и с использованием иных трассеров (Cs^{137} , Pb^{210} , ПАУ). Осуществлена оценка влияния различных типов естественной растительности (лес, луг) и режимов землепользования на темпы аккумуляции СМЧ почвенным покровом. Изучалось воздействие на перераспределение СМЧ в почвах разных типов естественной растительности; различного хозяйствования (пашня, залежь, опытные лесомелиоративные участки, грунтовые насыпи археологических памятников) и различных геоморфологических позиций (плакоры, склоны различной экспозиции и крутизны, днища балок). Исследовалось содержание СМЧ в погребенных (под мелиоративными и оборонительными сооружениями 30-40-х гг. XX в.) и новообразованных (пойменные и балочные отложения) субстратах. На основании данных, полученных при исследовании различных промышленных зон, оценены различия в объемах выпадения СМЧ на поверхность почвы на разном удалении от источника.

Естественно, что в настоящее время существует ряд вопросов и перспективных направлений исследования. В частности, длительность выпадения СМЧ на поверхность почвы связана с деятельностью целого ряда источников поступления вещества в природные системы, неравномерно распределенных как в пространстве, так и во времени, что создает дополнительную проблему их (источников) идентификации. Решение этой задачи может дать возможность оценивать процессы почвенного массопереноса не только интегрально за весь период выпадения СМЧ, но и дифференцировано, за период действия только конкретного источника. Кроме того, до сих пор метод ТММ применялся преимущественно для исследования относительно небольших объектов (отдельные археологические объекты, ЭРС малых эрозионных форм и долин малых рек и т.п.). Более масштабные площадные исследования применялись лишь в случае оценки воздействия на окружающую среду отдельных предприятий, образующих локальные геохимические аномалии. Таким образом, представляется перспективным исследование и картирование с помощью СМЧ эрозионных процессов на больших площадях.

Решение этих и ряда других проблем позволяет также расширить и сферу практического применения описанного метода. Например, разделение СМЧ по источнику происхождения позволит оценивать воздействие на конкретную территорию различных источников загрязнения. Кроме этого, разработка способов картирования эрозионных процессов с применением ТММ или при сопряженном использовании нескольких маркеров дает возможность проведения оценки динамики эрозионных потерь в границах деятельности сельскохозяйственных предприятий.

Вышесказанное позволяет считать, что изучение СМЧ в почвах является на данный момент перспективным направлением в изучении открытых почвенных систем.

Работы выполнялись при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №04-05-64607).

Табл. 1. Запасы сферических магнитных частиц (СМЧ) в почвах различных территорий

Местоположение, Ландшафт	Почвы	Земле-пользование	Удаленность от источника СМЧ, км	СМЧ, г/м ² , 0-30см	Источник
Московская обл., Ногинский р-н, южнотаежный, территория техногенной геохимической аномалии	Болотно-подзолистые	Пашня	1	54,6	Геннадиев и др., 2004в
	Аллювиальная слабообразованная	Нераспаханная пойма	1	5,9	
	Аллювиальная лугово-болотная	Нераспаханная пойма	5	21,6	
Московская обл., Сергиевопосадский р-н, южнотаежный	Дерново-подзолистые и дерновые	Лес	1,5-2	6-17	Olson et al., 2002 a
		Пашня		6-16	
Московская обл., Солнечногорский р-н, южнотаежный	Дерново-подзолистые и дерновые	Лес	3-4	26-35	Геннадиев и др., 2005а
		Пашня		5-13	
Калужская обл., Боровский р-н, южнотаежный	Дерново-подзолистые и дерновые	Лес	16-18	6	Геннадиев и др., 2004в
		Пашня		2	
	Аллювиальные и дерновые	Луг		1-3	
Белгородская обл., Белгородский р-н, лесостепной	Черноземы и темно-серые лесные	Лес	7-8	3-6	
		Луг		1-3	
Курская обл., лесостепной	Дерновые	Луг	Не менее 25	1	
США, штат Иллинойс, Диксон-Спрингс, лесостепной	Лесные текстурно-дифференцированные (типичные фразджиудальфы)	Лес	7-8	21-38	Hussain et al., 1998
		Пашня		8-19	
США, штат Иллинойс, Коллинсвилл, лесостепной	Террасовые луговые и лесные слитизированные (вертик гап-лакволлы): целинные под лугами и лесом, старопахотные	Лес	0,5-2	11-156	Геннадиев и др., 2001а, 2002б; Olson et al., 2002б, 2003а,б)
		Луг		47	
		Луг (старопахотный участок)		26-33	
Тульская область, Плавский район, лесостепной	Черноземы	Пашня	3-4	2,8-21,2	Геннадиев и др., 2005а
		Лес	10	8,4-17,9	
		Пашня	10	8,1-14,4	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабанин В. Ф., Трухин В. И., Карпачевский Л. О., Иванов А. В., Морозов В. В. Магнетизм почв. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1995. 223 с.
- Геннадиев А. Н., Голосов В. Н., Чернянский С. С., Маркелов М. В., Олсон К. Р., Ковач Р. Г., Беляев В. Р. Анализ сопряженного использования радиоактивного и магнитного трассеров для количественной оценки эрозии почв // Почвоведение. 2005а. № 9. С. 1080-1093.
- Геннадиев А. Н., Олсон К. Р., Чернянский С. С., Джонс Р. Л. Количественная оценка эрозионно-аккумулятивных явлений в почвах с помощью техногенной магнитной метки // Почвоведение, 2002а. № 1. С. 21-32.
- Геннадиев А. Н., Олсон К. Р., Чернянский С. С., Джонс Р. Л. Почвообразование, эрозия и загрязнение почв на территории древнего поселения «Кахокиа» в долине р. Миссисипи (США) // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2001а. № 3. С. 33-38.
- Геннадиев А. Н., Олсон К. Р., Чернянский С. С., Джонс Р. Л. Применение метода техногенной магнитной метки для количественно-хронологической оценки механической миграции вещества в почвах (на примере почв курганного поля «Кахокиа», США) // Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена, 2002б. С. 370-388.
- Геннадиев А. Н., Олсон К. Р., Чернянский С. С., Джонс Р. Л. Формирование и деградация курганных почв древнего индейского поселения «Кахокиа» (США). Тезисы Четвертой всероссийской конференции "Проблемы эволюции почв" 9-12 апр. 2001. Тез. докладов. Пушкино, ОНТИ ПНЦ. М.: ПОЛТЕКС, 2001б. С. 64-66.
- Геннадиев А. Н., Олсон К. Р., Чернянский С. С., Джонс Р. Л., Вудс У. И. Использование сферических магнитных частиц в качестве индикатора-метки при изучении почв курганного комплекса "Кахокиа", США // Почвы – национальное достояние России. Материалы IV Съезда Докучаевского общества почвоведов. Новосибирск, 9-13 августа 2004 г. Книга 1. Новосибирск: "Наука-Центр", 2004а. С. 173.
- Геннадиев А. Н., Пиковский Ю. И., Чернянский С. С., Алексеева Т. А., Ковач Р. Г. Миграция и аккумуляция полициклических ароматических углеводородов при техногенном загрязнении почв. Сб. докладов Международной научной конференции «Современные проблемы загрязнения почв». Москва. 2004б. Ф-т почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова. С. 13-15.
- Геннадиев А. Н., Чернянский С. С. Использование сферических магнитных частиц в качестве индикатора-метки при изучении катенарных почвенных сопряжений // Проблемы эволюции почв. Пушкино: ОНТИ ПНЦ, 2003. С. 102-107.
- Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Ковач Р. Г. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. 2004в. № 5. С. 566-580.
- Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Олсон К. Р., Ковач Р. Г. Индикация параметров массопереноса в почвах по содержанию сферических магнитных частиц // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2005. № 3. С. 29-35.
- Голосов В. Н. Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26-33.
- Иванова Н. Н., Голосов В. Н., Маркелов М. В. Сравнение методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых почвах // Почвоведение. 2000. № 7. С. 876-887.
- Gennadiyev A. N., Chernyanskii S. S., Kovach R. G. Magnetic spherules as soil microcomponent and tracer of soil matter transport // Eurasian Soil Science. 2004. #5. P. 486-499.
- Gennadiyev, A. N., Olson K. R., Chernyanskii S. S. Jones R. L. Studying Soil Erosion Dynamics using Magnetic Spherula as Tracer // Abstracts of ASA Annual meeting. Denver, CO. 2003.
- Gennadiyev A. N., Olson K. R., Chernyanskii S. S. Jones R. L. Quantitative Assessment of Soil Erosion and Accumulation Processes by Using Technogenic Magnetic Tracer // Eurasian Soil Science. 2002а. №1. P. 17-29.
- Gennadiyev A. N., Olson K. R., Chernyanskii S. S., Jones R. L., Woods W. I. Quantification of soil erosion rates within Indian mounds area in Illinois, USA // Eurasian Soil Science. 2002б. Vol. 35. Suppl. 1. P. S8-S17.
- Hussain I., Olson K. R., Jones R. L. Erosion Patterns on Cultivated and Uncultivated Hillslopes Determined by Soil Fly Ash Contents // Soil Science. 1998. V. 163. № 9. P. 726-738.
- Jones R. L., Olson K. R. Fly Use as a Time Marker in Sedimentation Studies//Soil Science Society of America Journal. 1990. № 54. P. 1393-1401.

- Olson K. R., Gennadiev A. N., Jones R. L., Chernyanskii S. S. Erosion Patterns on Cultivated and Reforested Hillslopes in Moscow Region, Russia // Soil Science Society of America Journal. 2002a. V. 66. № 1. P. 193-201.
- Olson K. R., Jones R. L., Gennadiev A. N., Chernyanskii S. S., Woods W. I., Lang J. M. Accelerated erosion on a Mississippian mound at Cahokia site in Illinois // Soil Science Society of America Journal. 2002b. V. 66. № 6. P. 1911-1921.
- Olson K. R., Jones R. L., Gennadiev A. N., Chernyanskii S. S., Woods W. I., Lang J. M. Soil catena formation and erosion of two Mississippian mounds at Cahokia archaeological site, Illinois // Soil Science. 2003a. V. 168(11). P. 812-824.
- Olson K. R., Jones R. L., Gennadiev A. N., Chernyanskii S. S., Woods W. I. Soil development on Monks Mound at the Cahokia Archaeological Site, Illinois // Soil Survey Horizons. 2003b. V. 44. № 3. P. 73-106.
- Olson K. R., Jones R. L., Gennadiyev A. N., Chernyanskii S. S., Woods W. I. Soil formation on a Mississippian Mound in Illinois, USA // 17th International Congress of Soil Science. Abstracts. Vol. II. Bangkok, Thailand. 2002b. P. 739.