

УДК 631.484:631.461.62

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА КАК ФАКТОР МОБИЛИЗАЦИИ ТРУДНО-РАСТВОРИМЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

А.Д. ФОКИН, А.И. КАРПУХИН, П.А. РАДЖАБОВА

(Кафедра применения изотопов и радиации в сельском хозяйстве, кафедра почвоведения)

Исследовали кинетику микробиологической мобилизации биогенных элементов из минералов гранита. Результаты модельных опытов показали, что под влиянием процессов, связанных с гетеротрофной деструкцией органического вещества, подвижность К, Са, Fe, и Mn значительно возрастает. Наблюдалось существенное различие в кинетике образования подвижных форм металлов в зависимости от характера разлагаемого органического соединения (глюкозы и лигнина).

Большая часть органического вещества, синтезированного первичными продуцентами, попадает в почву, где трансформируется гетеротрофными организмами, главным образом грибами и бактериями. По мере разложения питательные элементы, содержащиеся в растительных остатках, высвобождаются и могут быть вновь использованы растениями. Одновременно в процессе микробиологического превращения орга-

нического вещества происходит мобилизация и включение в биогеохимический круговорот элементов питания из минеральных фондов почвы — труднорастворимых солей, первичных и вторичных минералов.

Мобилизация биогенных элементов является результатом взаимодействия конечных и промежуточных продуктов микробиологической трансформации растительных остатков (СО₂, органи-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 93—05—14252).

ческих кислот, комплексообразователей, органических восстановителей и др.) с минеральными компонентами почвы и почвообразующих пород. Кроме того, увеличение подвижности элементов может быть вызвано процессами, косвенно связанными с метаболизмом почвенных микроорганизмов, например, изменением Eh и pH [1, 4].

Наши знания о реализации перечисленных механизмов, темпах и масштабах образования подвижных форм минеральных соединений в зависимости от регулирующих факторов ограничены. Для всестороннего решения этой проблемы необходимы дальнейшие исследования.

Задача настоящей работы — исследование кинетики биологической мобилизации элементов минерального питания из минералов почвообразующей породы в зависимости от природы разлагаемого органического вещества. В условиях модельного эксперимента изучали мобилизацию K, Ca, Fe и Mn из мелкокристаллической фракции гранита в процессе микробиологической трансформации легкодоступного (глюкоза) и сравнительно более устойчивого к разложению микроорганизмами (целлолигин) источников углерода и энергии (влаги и температура не лимитированы).

Методика

В опыте был использован гранит следующего химического состава (% на элемент): Si — 34,0; Al — 7,3; Fe⁺³ — 0,6; Fe⁺² — 1,3; Mn — 0,04; Mg — 0,31; Ca — 1,0;

Na — 2,3; K — 4,5; P — 0,08. Минералогический состав: кварц, ортоклаз, альбит, биотит. Глюкоза х.ч., характеристика целлолигина: зольность — 6,5%; рН_{вод} — 5,5; рН_{сол} — 4,5.

Предварительно раздробленные до частиц размером 0,5—0,25 мм 10 г породы помещали в стеклянные стаканчики, добавляли 150 г органического вещества (по углероду) и (NH₄)₂SO₄. Инокуляцию проводили смешанной популяцией из почвенной суспензии. Контролем являлись варианты без внесения органического вещества. Мобилизацию элементов изучали при влажности 90% ПВ и температуре 30° С.

Глюкозу вносили в виде концентрированного раствора. Целлолигин, предварительно измельченный до частиц размером < 0,25 мм и отмытый слабощелочным раствором HCl и водой для удаления зольных элементов, равномерно перемешивали со всей массой породы. Параллельно наблюдали за микробиологическим разложением глюкозы и целлолигина в кварцевом песке.

Инкубирование в малобуферной среде позволяет наблюдать за накоплением кислотных продуктов разложения по изменению pH, а также учитывать возможную мобилизацию зольных веществ из лигнина.

Во всех вариантах определяли CO₂ (данные не приводятся) и ежедневно измеряли Eh среды. Было предусмотрено 4 срока компостирования — 4, 10, 30 и 100 дней. По окончании времени инкубации проводили последовательную экстракцию металлов

водой и раствором Mehlich-3. Первую водную вытяжку получали при соотношении порода : раствор 1 : 5. После 5-минутного встряхивания в суспензии измеряли рН, затем суспензию центрифугировали и в растворе определяли углерод и металлы. Для получения второй водной вытяжки породу заливали водой при соотношении 1 : 10, взбалтывали в течение часа, после центрифугирования в растворе определяли металлы.

В статье приводятся данные по общему содержанию водорастворимых форм металлов в пересчете на 100 г породы. Экстракцию раствором Mehlich-3 проводили при соотношении 1 : 10, взбалтывали 3 мин, так же как в предыдущих вытяжках металлы определяли в отцентрифугированном растворе. Реактив Mehlich-3 представляет собой универсальный экстрагент следующего состава: $0,015n \text{ NH}_4\text{F} + 0,25n \text{ NH}_4\text{NO}_3 + 0,2n \text{ CH}_3\text{COOH} + 0,013n \text{ HNO}_3 + 0,001M \text{ ЭДТА}$; рН раствора — 2,5 [5].

Металлы определяли на ААС фирмы «Perkin-Elmer» углерод-бихроматным методом, Eh и рН измеряли потенциометрически. Опыт проводился в 5-кратной повторности.

Результаты и обсуждение

Под действием микробиологических процессов происходит интенсивная мобилизация К, Са, Fe и Mn из гранита (рисунок). Выявлено существенное различие в кинетике образования мобильных форм катионов в зависимости от природы метаболизируемого ор-

ганического вещества. Различия обусловлены в первую очередь разным характером микробиологического разложения исследуемых органических соединений.

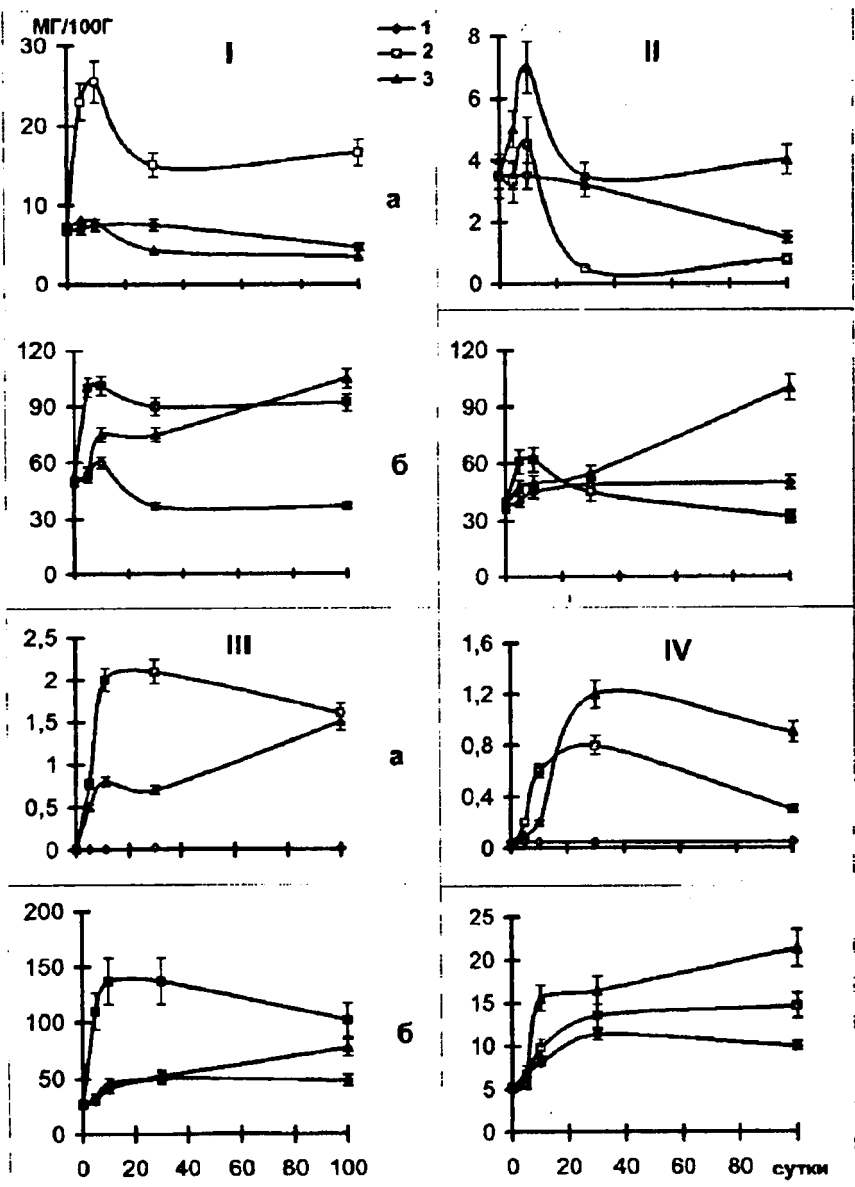
Глюкоза интенсивно трансформировалась микроорганизмами в первые 3-10 дней компостирования с образованием CO_2 и органических кислот. В этот период наблюдалось резкое увеличение растворимости К, Fe и Mn по сравнению с этим показателем в варианте с чистой водой.

Содержание водорастворимых форм калия возросло в 3—3,5 раза в первые сроки наблюдения и заметно уменьшилось через 30 и 100 дней компостирования; количество калия, экстрагируемого раствором Mehlich—3, увеличилось в 2—2,5 раза, максимальные значения регистрировались через 5 и 10 дней инкубации.

Растворимость железа выросла в 80—100 раз. Наибольшее количество водорастворимого железа образовалось через 10 дней компостирования — 2 мг на 100 г породы, что в 200 раз превышает контрольные значения. Количество железа, извлекаемого раствором Mehlich-3, увеличилось в 3—3,5 раза.

В течение первых 30 дней инкубации наблюдалось увеличение водорастворимых форм марганца в 7, 12 и 16 раз соответственно по срокам отбора; в дальнейшем мобилизационный эффект заметно уменьшался.

Поведение кальция отличалось от поведения других элементов. При компостировании с глюкозой его растворимость существенно не изменилась, более того, при



Динамика образования подвижных форм калия (I), кальция (II), железа (III) и марганца (IV).
 а — водорастворимые формы, экстрагируемые раствором Mehlich—3; 1 — контроль; 2 — глюкоза; 3 — целлюлозин.

длительной инкубации (30 и 100 дней) содержание водорастворимых форм составило соответственно 0,49 и 0,8 мг на 100 г породы, что в 7 и 4 раза меньше контроля. Количество кальция, извлекаемого раствором Mehlich-3, было выше, чем в контроле в первые дни инкубации, но со временем снижалось.

Микробиологическое превращение *целлолигнина* происходило более медленно. Содержание водорастворимых соединений углерода увеличивалось постепенно от 5 мг в 1-й срок наблюдения до 30 мг через 100 дней инкубации. По мере развития микробиологических процессов и разложения *целлолигнина* увеличивалось количество экстрагируемых форм металлов.

Содержание калия, извлекаемого раствором Mehlich-3, значительно возросло через 10 дней компостирования и к концу опыта было выше, чем в вариантах с глюкозой. В то же время количество калия в водной вытяжке варьировало в пределах контрольных значений во все сроки наблюдения.

Содержание водорастворимого железа, так же как и в опытах с глюкозой, значительно возросло и превышало контрольные значения в 50—80 раз. В меньшей степени процессы микробиологического разложения *целлолигнина* повлияли на содержание железа, извлекаемого раствором Mehlich-3: существенное его увеличение (в 1,7 раза) регистрировалось лишь через 100 дней компостирования.

Кратковременное повышение содержания водорастворимых

форм кальция (в 2 раза) наблюдалось при 10-дневном компостировании, в остальные сроки наблюдения оно незначительно отличалось от контрольных значений. Количество кальция, экстрагируемого раствором Mehlich-3, значимо возросло (в 2 раза) лишь к концу эксперимента.

Положительное действие *целлолигнина* на подвижность марганца существенно превышало действие глюкозы (за исключением первых сроков наблюдения). Количество водорастворимого марганца в первые сроки инкубации увеличилось в 3 и 4 раза, с увеличением сроков взаимодействия превышение над контрольными значениями составило 20 и 24 раза. Содержание элемента, экстрагируемого раствором Mehlich-3, значительно возросло через 10 дней компостирования, в дальнейшем оно продолжало увеличиваться, но менее интенсивно.

Развитие микробиологических процессов сопровождалось заметным изменением физико-химических параметров среды. Наблюдения за динамикой pH и Eh показали, что уже в первые дни микробиологического разложения глюкозы значение Eh снизилось до 190 мВ, но по мере потребления органического субстрата происходило увеличение значения Eh, которое к концу эксперимента достигало 350 мВ. За счет интенсивного растворения катионов из минералов гранита отмечалось подщелачивание водного раствора. Из данных таблицы видно, что увеличение подвижности катионов по времени совпадало с сильным снижением pH в малобу-

ферной среде (опыт с кварцевым песком).

Обратная картина наблюдалась в опытах с целлюлигином: значение E_h уменьшалось постепенно от 300 мВ в первые дни наблюдения до 200 мВ к концу эксперимента. По мере разложения органического вещества снижалось значение рН. Нейтрализация кислотных продуктов микробного метаболизма происходила в гораздо меньшей степени, чем продуктов разложения глюкозы.

В нашем опыте по существу воспроизводятся начальные стадии почвообразования, когда первичные минералы почвообразующих пород подвергаются воздействию водорастворимых экзопродуктов микробного метаболизма, отличающихся большей растворяющей способностью, чем вода. Уксусная, лимонная, масляная и другие кислоты, образующиеся в процессе микробиологической трансформации глюкозы в анаэробных условиях [1], способны не только извлекать металлы из кристаллических решеток минералов, но и удерживать их в растворенном состоянии за счет образования хелатных соединений. При деструкции целлюлигина в раствор поступают олигомерные и мономерные составляющие целлюлозы и лигнина и продукты их дальнейшего расщепления, также способствующие мобилизации элементов из породы и образованию водорастворимых органо-минеральных соединений [4].

Высокая концентрация металлов в водном растворе в интервале рН 6,5-7,9, соответствующем минимальной растворимости

ионных форм Fe^{+2} и Fe^{+3} , а также ионных форм марганца, объясняется формированием комплексных соединений поливалентных металлов с продуктами разложения органического вещества [1, 2]. Одновременно микробиологическое превращение глюкозы в присутствии гранита привело к образованию темноокрашенных гумусовых соединений (окрашивание водного раствора наблюдалось через 30 дней инкубации). Подобный эффект взаимодействия продуктов микробного метаболизма и почвообразующей породы наблюдали и другие исследователи [3].

Невысокое содержание водорастворимых форм калия в опытах с целлюлигином, по-видимому, связано с сорбцией металла на поверхности нерастворимых частиц органического вещества в результате реакций обмена ионов калия, поступающих в раствор, на водородные ионы кислотных компонентов целлюлигина.

Кальций — один из легковослащиваемых элементов кристаллической решетки минералов, и низкая его растворимость, наблюдаемая в опыте с глюкозой, может быть связана с образованием малорастворимых вторичных соединений элемента. В условиях непромывного водного режима и развития интенсивных микробиологических процессов это могут быть карбонаты кальция.

В результате компостирования наблюдалось изменение морфологических свойств породы. Через 2 мес инкубации в вариантах с органическим веществом гранит приобрел желтовато-бурый цвет,

**Динамика рН, Eh и концентрации водорастворимых углеродных соединений
(t 30°С, влажность 80—90% ПВ)**

Показатель	Чистая вода				Опыт с глюкозой				Опыт с лигнином			
	продолжительность опыта, дни											
	5	10	30	100	5	10	30	100	5	10	30	100
рН	7,7	7,8	7,7	7,7	$\frac{7,8}{4,7}$	$\frac{7,9}{5,5}$	$\frac{7,9}{5,7}$	$\frac{7,9}{6,0}$	$\frac{6,7}{5,9}$	$\frac{6,7}{5,9}$	$\frac{6,5}{5,7}$	$\frac{6,5}{5,3}$
С, мг	—	—	—	—	$\frac{83}{70}$	$\frac{75}{65}$	$\frac{65}{50}$	$\frac{50}{20}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{20}{7}$	$\frac{30}{25}$
Eh, мВ400	—	—	500	—	190	200	350	320	300	300	250	200

Примечание. В знаменателе приводятся данные опытов в кварцевом песке.

особенно ярко выраженный в опытах с глюкозой; при взаимодействии только с водой гранит имел кирпично-красную окраску. Во всех вариантах на породе образовались черные и охристые пятна, происходила агрегация минеральных частиц, наиболее сильно выраженная в опытах с глюкозой.

Заключение

В процессе микробиологической деструкции органического вещества происходила интенсивная мобилизация К, Са, Fe и Mn из гранита.

Наблюдались существенные различия в скорости и интенсивности образования подвижных форм металлов в зависимости от природы метаболизируемого органического вещества (глюкозы и лигнина).

В вариантах с глюкозой наибольший мобилизационный эффект проявлялся в первые 10 дней инкубации; при компостировании с лигнином положительное

действие усиливалось в течение всего времени взаимодействия (100 сут).

Отмеченные различия связаны в первую очередь с разным характером разложения исследуемых соединений, точнее, с разной кинетикой поступления в раствор химически активных продуктов микробиологического превращения органического вещества и с различной динамикой Eh и рН.

В результате компостирования происходило заметное изменение морфологических свойств породы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. — 2. Карпунин А.И. Превращение гидроокси железа при совместном компостировании с органическими веществами. — Докл. ТСХА, 1968, вып. 144, с. 111—114. — 3. Berthelin J., Dommergues Y. — Res. ecol. biol. sol., 1972, t. 9, № 3. — 4. Stevenson F. Humus chemistry. Gene-

sis, composition, reactions, N.—Y.,
1982, Wiley—Interscience, p. 443. —
5. *Tran S., Giroux, Guilbeault*

a. Audesse P. — Commun. in Soil
Sci. Plant Anal., 1990, vol. 21,
p. 1—28.

*Статья поступила 12 апреля
1996 г.*

SUMMARY

Kinetics of microbiological mobilization of biogenic elements from granite minerals was investigated. Results of model experiments have shown that under the effect of processes connected with heterotrophic destruction of organic matter mobility of K, Ca, Fe and Mn became much higher. An essential difference was observed in kinetics of producing mobile forms of metals depending on the nature of decomposed organic compound (glucose and lignin).