

СОДЕРЖАНИЕ

Биогеохимия

- В о д я н и ц к и й Ю.Н., Ш о б а С.А. Биогеохимия углерода, железа и тяжелых металлов в переувлажненных почвах (аналитический обзор). 3

Генезис и география почв

- А л я б и н а И.О., К у к у ш к и н а О.В. Трансформация отображения почвенного покрова Нижегородской губернии на картах в XIX—XX веках 13
- Ж у к о в а Ю.А., Х а й д а п о в а Д.Д., К о в д а И.В., М о р г у н Е.Г. Реологические характеристики слитоземных комплексов почв в разных климатических условиях. 25
- К и р и л л о в а Н.П., С и л ё в а Т.М. Таксономическая диагностика почв с помощью автоматизированного определителя 31

Экология

- А г а п к и н а Г.И., С т о л б о в а В.В., Б р о д с к и й Е.С., Ш е л е п ч и к о в А.А., Ф е ш и н Д.Б. Приоритетные органические загрязнители в почве дендропарка Ботанического сада МГУ имени М.В. Ломоносова. Сообщение 2. Особенности вертикального распределения полициклических ароматических углеводородов в профиле урбо-дерново-подзолистой почвы 37

Почвенная биология

- Н а д ж а ф о в а С.И. Экологическое состояние почвенного покрова вдоль основных автомагистралей г. Баку. 46
- Ф у н г Т х и М и (Вьетнам), М а н у ч а р о в а Н.А., С т е п а н о в А.Л., П о з д н я к о в Л.А., С е л и ц к а я О.В., Е м ц е в В.Т. *Agrobacterium tumefaciens* — ассоциативная азотфиксирующая бактерия 50

CONTENTS

Biogeochemistry

Vodyanitskii Yu.N., Shoba S.A. Biogeochemistry of carbon, iron and heavy metals in wetlands (analytical review)	3
---	---

Genesis and Geography of Soils

Alyabina I.O., Kukushkina O.V. Transformation of the soil cover representation of Nizhegorodskaya province on maps in the XIX—XX centuries	13
Zhukova Yu.A., Khaydapova D.D., Kovda I.V., Morgun E.G. Rheological properties of vertisol complexes formed under various climate conditions	25
Kirillova N.P., Sileva T.M. An automated guide for soil classification	31

Ecology

Agapkina G.I., Stolbova V.V., Brodskiy E.S., Shelepchikov A.A., Feshin D.B. Priority organic pollutants in soil of arboretum in Botanical garden of Lomonosov MSU. Report 2. Peculiarities of vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the profile of urbo-soddy-podzolic soil	37
--	----

Soil Biology

Nadjafova S.I. Ecological state of soils alongside the main highways of the city Baku. . .	46
Phung Thi My (Vietnam), Manucharova N.A., Stepanov A.L., Pozdnyakov L.A., Selitskaya O.V., Emtsev V.T. <i>Agrobacterium tumefaciens</i> as associative nitrogen-fixing bacteria	50

БИОГЕОХИМИЯ

УДК 631.41:631.453

БИОГЕОХИМИЯ УГЛЕРОДА, ЖЕЛЕЗА И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ПОЧВАХ (аналитический обзор)

Ю.Н. Водяницкий, С.А. Шоба

Микроорганизмы и высшие растения играют значительную роль в биогеохимических процессах мобилизации и иммобилизации элементов питания и токсикантов в переувлажненных почвах. Особенно это сказывается на поведении редокс-чувствительных элементов — углерода, железа и тяжелых элементов (Cr, U и As). Углерод органического вещества в гидроморфных почвах участвует в редукции Fe(III) и других химических элементов с переменной валентностью. Оксиды железа сорбируют многие тяжелые металлы, а редукция оксидов железа под влиянием микробиологических процессов определяет их подвижность. Подвижность мышьяка как сидерофила возрастает за счет редукции (гидр)оксидов железа при снижении редокс-потенциала. Соединения хрома и урана в переувлажненных почвах выпадают в осадок, но за счет редукции (гидр)оксидов железа как носителей этих элементов их подвижность может возрасть.

Ключевые слова: гидроморфные почвы, биогеохимия, углерод, железо, тяжелые металлы.

Введение

Микроорганизмы и высшие растения играют значительную роль в биогеохимических процессах мобилизации и иммобилизации элементов питания и токсикантов. Влияние растений более сложное, так как ризосфера корней формируется как за счет корневых выделений, так и за счет пула микроорганизмов.

Специфически влияют биологические факторы на геохимию разных элементов в переувлажненных почвах [53—55]. Особенно это сказывается на поведении редокс-чувствительных элементов — углерода, железа и тяжелых элементов (хрома, урана и мышьяка).

Интерес к углероду продиктован важной ролью органического вещества в развитии гидроморфных почв [1, 5]. Железо как макроэлемент с переменной валентностью определяет их основные диагностические показатели [1]. Поскольку (гидр)оксиды железа выступают как сорбенты ряда тяжелых металлов, их редукция влияет на подвижность последних [21, 31, 34, 51].

Цель обзора — систематизировать сведения о биогеохимии углерода, железа и тяжелых металлов в переувлажненных почвах и проанализировать взаимодействие этих элементов при изменении редокс-условий.

Биогеохимия углерода

Органическое вещество окисляется при участии различных акцепторов электронов. Быстрее всего этот процесс идет в автоморфных почвах, где

электроны принимает кислород. Но при наличии достаточного количества альтернативных акцепторов электронов в доступной для микроорганизмов форме деструкция развивается и в гидроморфных минеральных почвах. Все акцепторы электронов, участвующие в деструкции органического вещества в анаэробной среде, можно разделить на две группы в зависимости от эффективности высвобождения энергии, необходимой для жизнедеятельности микроорганизмов [57]. Величину энергии, высвобождающейся при окислении органического вещества (например, в форме уксусной кислоты), сравнивают с таковой, выделяющейся при аэробном дыхании, принимаемой за 100%. К первой, высокоэнергетической группе относятся следующие реакции: денитрификация — 93, редукция марганца (IV) — 87, редукция железа (III) — 85% от энергии окисления уксусной кислоты в аэробных условиях. Низкоэнергетическая группа включает реакции сульфатредукции — 6 и метаногенеза — 3% от энергии аэробного окисления уксусной кислоты.

Фракции органического вещества разделяют на три большие группы — ароматические соединения, сахара + аминокислоты, предельные и жирные кислоты. Каждая группа имеет свой механизм анаэробного окисления. Так, в случае редукции ароматических соединений при участии бактерий-окислителей распадаются до CO₂. При ферментации сахаров и аминокислот образуется газообразный водород. Ацетат, а также простые жирные кислоты при участии водорода (как источника энергии) биологическим путем окисляются до углекис-

лого газа. Метаногенез — более сложный процесс деструкции. В итоге все группы органического вещества распадаются до водорода и ацетата с последующим образованием углекислого газа и метана.

Без участия органического вещества глееобразование невозможно. При этом переувлажнение поверхностных горизонтов вызывает его значительную трансформацию [5, 7].

Микробиологи, изучающие биологическое восстановление (гидр)оксидов железа, выделяют две функции органического вещества почв [55] — как источника энергии, т.е. поставщика электронов, и как челнока — переносчика электронов от *Fe*-редуцирующих бактерий к *Fe*(III). В первом случае мощным источником энергии являются сахара, во втором роль электронного челнока принадлежит гуминовым кислотам, причем, в отличие от первого варианта, органическое вещество в процессе редукции *Fe*(III) не расходуется.

К настоящему времени накопилось достаточно данных, свидетельствующих о потере гумуса в ходе оглеения за счет восстановления (гидр)оксидов железа [11]. Наиболее ярко это проявляется в почвах под рисом. Рассчитана степень окисления органического вещества (в форме CH_2O) за период их затопления [69]: на одних полях его доля составляла от 1/3 до 2/3 суммарной продукции CO_2 , на других — от 1/7 до 6/7. Опытами по биологической редукции 18 почв из разных стран мира установлено, что количество полностью минерализованного углерода прямо коррелирует с содержанием редуцированного железа (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,64$). Следовательно, влияние редукции *Fe*(III) на процесс деструкции органического вещества в почвах со слабым водообменом оказывается вполне ощутимым. Очевидно, что общий итог редукции *Fe*(III) — потеря части органического вещества. Так как основной процесс почвообразования — гумусонакопление, то оглеение, сопровождаемое окислением органического вещества, надо рассматривать как деградиционный процесс.

Биологическая редукция $\text{Fe}(\text{OH})_3$ должна сказываться не только на количестве, но и на качестве гумуса оглеенных горизонтов. В редокс-отношении состав гумуса крайне неоднороден. Его компоненты различаются по степени окисленности: они выступают и как окислители, и как восстановители. Различие в энергии гуминовых (ГК) и фульватных (ФК) кислот значительное. Если оценивать энергию по теплоте сгорания, то в дерново-подзолистых почвах для гуминовых кислот она достигает в среднем 18, тогда как для фульвокислот — только 12 кДж/г [9].

Иногда в оглеенных лесных почвах снижение отношения $C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}}$ может быть результатом потери энергии гуминовых кислот за счет редукции *Fe*(III). В.И. Савич с соавт. [11] приводят такие результа-

ты. В автоморфных серых лесных почвах Западной Сибири отношение $C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}}$ достигает 1,5—2,0. Оглеение приводит к снижению гуматности гумуса. В глубокооглеенных почвах это отношение уменьшается до 1,0, а в поверхностно оглеенных — до 0,6—0,7.

Подчеркнем важное обстоятельство. Соединения *Fe*(III) редуцируются только за счет активных фракций органического вещества. Низкоэнергетическая плохо разложившаяся торфянистая масса не способна выступать источником энергии для редуционных процессов. Вероятно, в связи с этим в пределах мерзлотно-таежной области Восточной Сибири широко распространены мерзлотные гидроморфные неглеевые почвы [12]. Обычно на поверхности почв имеется торфянистый слой мощностью ~10 см. Под ним располагается бурый влажный гор. ВО с высоким содержанием гумуса (9—30%), причем гумус фульватного типа ($C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}} = 0,6—0,7$) и содержит много негидролизующего остатка (60—70%). Наличие низкоэнергетического фульватного гумуса и обилие инертного негидролизующего остатка снижают энергетическую ценность органического вещества. Переувлажненные криоземы не содержат железистых новообразований и отличаются равномерным распределением свободного железа без локального обезжелезнения и ожелезнения. Для них характерно высокое содержание свободных соединений, достигающее 3—5% (Fe_2O_3)_{д.т.} Таким образом, процессы редукции и обезжелезнения, характерные для европейских оглеенных почв, не развиваются в переувлажненных азиатских криоземах.

Биогеохимия железа

Из всех акцепторов электронов в анаэробной среде выделяется *Fe*(III). Для этого есть несколько причин. Во-первых, у железа очень высокий кларк — выше, чем у серы и марганца. Уже поэтому его роль в деструкции органического вещества является ведущей. Во-вторых, в результате редукции *Fe*(III) до *Fe*(II) изменяется цвет почвы, что и служит основой диагностики оглеенных почв (холодный цвет). Поэтому неудивителен огромный интерес исследователей к процессам биохимической редукции *Fe*(III).

Судьба железа в переувлажненных почвах определяется возможностью его восстановления. Для этого нужны следующие предпосылки. Во-первых, само *Fe*(III) должно быть сосредоточено в соединениях, доступных микроорганизмам для редукции. Во-вторых, поскольку процесс редукции эндотермический, требуется источник энергии — легкоокисляемое органическое вещество. В-третьих, нужны бактерии-железоредакторы, катализирующие процесс редукции [1, 6, 55]. Среди них наиболее изучены представители родов *Geobacter* и *Shewa-*