

**ПОКАЗАТЕЛИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
И МЕТАЛЛОИДОВ В ПОЧВАХ СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ***Ю. Н. Водяницкий*

Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН

Для геохимической характеристики почв предложены два новых показателя. Контрастность кислотно-щелочного барьера предлагается определять из выражения:  $h_{(H)} = \Delta pH/l$  (где  $l$  – расстояние между соседними разрезами в геохимической катене) при превышении критического уровня  $|h_{(H)}| > 0.002$  рН/м, контрастность редокс барьера – из выражения:  $h_{(e)} = \Delta pe/l$  при  $|h_{(e)}| > 0.005$  pe/м. Предложены новые геохимические модули на основе валового содержания элементов, характеризующих степень закрепления микроэлементов железо- и марганец-содержащими фазами-носителями. Среди них «медный модуль» как молярное отношение  $Cu/Fe$ ; «никелевый модуль» –  $Ni/Fe$ ; «арсенатный модуль» –  $As/Fe$ ; «фосфатный модуль» –  $P/Fe$  и «свинцовый модуль» –  $Pb/Mn$ . С увеличением модуля снижается прочность закрепления микроэлемента, соответствующей фазой-носителем. Установлены фоновые значения геохимических модулей для почв среднего Предуралья.

В современной геохимии почв остро стоит вопрос о количественном представлении основных геохимических показателей, многие из которых выражены пока качественно или количественно, но не вполне адекватно (Геохимические барьеры..., 2002). В работе рассматриваются два показателя закрепления микроэлементов. Первый – это степень контрастности кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных (редокс) барьеров в почвенной геохимической катене. Второй – геохимический модуль закрепления микроэлементов (в особенности техногенных) железо- и марганец-содержащими фазами-носителями.

Цели исследований: 1) количественно охарактеризовать контрастность кислотно-щелочных и редокс барьеров в геохимических катенах; 2) использовать геохимические модули для оценки степени закрепления валового содержания микроэлементов Fe- и Mn-содержащими фазами-носителями в почвах Предуралья.

Новые геохимические показатели апробировались на разных почвах Среднего Предуралья. Контрастность кислотно-щелочных и редокс барьеров изучали в ходе режимных наблюдений. Анализировали почвы двух катен на древнеаллювиальных отложениях р. Кама в Краснокамском районе Пермского края (Водяницкий и др., 2006), а также катену на элювиальном пермских глин в Пермском районе. Протяженность катен 500-2000 м. Катена Ласьева, включающая почвы легкого гранулометрического состава, расположена в 10 км к западу от г. Пермь. Катена представлена песчаными агроземами и супесчаной дерновой оподзоленной глееватой

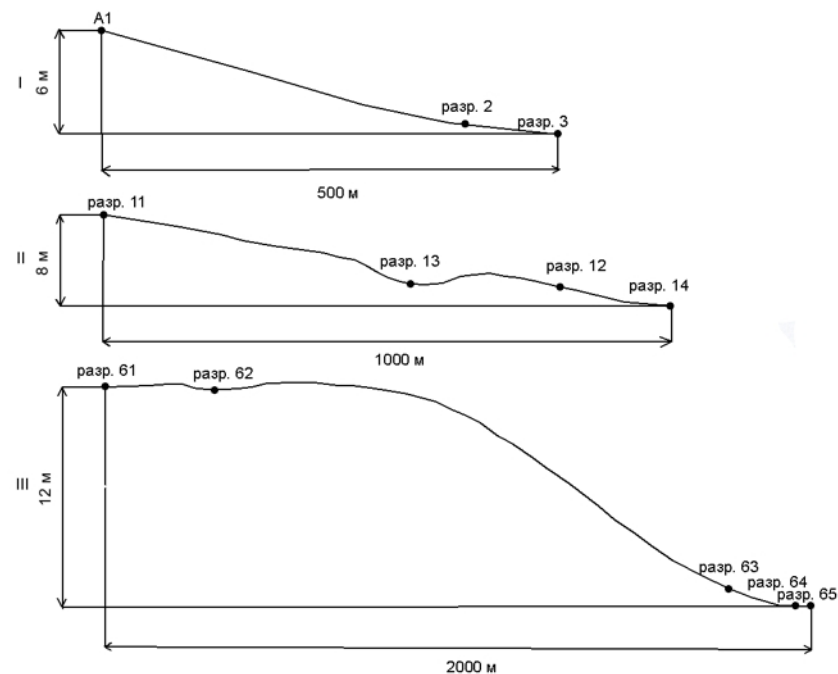
почвой. Катена Бекрята, включающая почвы тяжелого гранулометрического состава на древнеаллювиальных отложениях, расположена в 30 км к северо-западу от г. Пермь. Катена по направлению от возвышенности к депрессии представлена агродерново-подзолистыми (неоглеенной, глееватой, глеевой) и темногумусово-глеевой почвами. Катена Соболи в южном пригороде г. Пермь включает почвы агродерново-подзолистую неоглеенную и глееватую, агробурозем, темногумусово-глеевую и перегнойно-гумусово-глеевую почвы. Схемы катен даны на рис. 1.

Геохимические модули тяжелых металлов и металлоидов определяли для аллювиальных и дерново-подзолистых почв, испытывающих влияние Пермско-Краснокамского промышленного узла. В качестве аллювиальных выбраны почвы в г. Пермь, расположенные в поймах левых притоков р. Кама: Ива, Егошиха, Данилиха, Мулянка, и правого – Ласьва. Аллювиальная лугово-болотная среднесуглинистая почва в пойме р. Ива находится в 300 м от площади Восстания. Аллювиальная лугово-болотная супесчаная почва в пойме р. Егошиха расположена в 100 м от южной дамбы. Аллювиальная лугово-болотная среднесуглинистая почва в пойме р. Данилиха находится в 500 м от железнодорожного вокзала Пермь-2. Аллювиальная лугово-болотная среднесуглинистая почва в пойме р. Мулянка находится в 200 м от пересечения реки с мостом по ул. Шоссе Космонавтов. Аллювиальная лугово-болотная легкосуглинистая почва в пойме р. Ласьва находится в 1 км ниже по течению от г. Краснокамск. Все, кроме почвы, расположенной в долине р. Ива, испытывают антропогенную нагрузку (Состояние и охрана..., 2005).

Кроме того, геохимические модули определяли для дерново-подзолистых почв, испытывающих влияние Пермско-Краснокамского промышленного узла в катене Бекрята.

Полевые режимные исследования включали определение рН и  $E_H$ . Редокс потенциал  $E_H$  и рН почвенного раствора измеряли при естественной влажности в трехкратной повторности в верхних горизонтах почв в 2005 г. портативным рН-метром HI-9025 фирмы Hanna Instruments. Для измерения  $E_H$  применяли комбинированный редокс электрод с хлорсеребряным электродом сравнения HI 3230. Замеренные значения электродвижущей силы приводили к  $E_H$  относительно водородного электрода. Для измерения рН использовали рН-электрод HI 1230. Измерения проводили один раз в декаду в свежевыкопанной прикопке в трехкратной повторности. Затем рассчитывали среднее значение показателей для каждого горизонта.

В лаборатории определяли валовое содержание макро- и микроэлементов в мелкозем и в железо-марганцевых конкрециях рентгенофлуоресцентным методом на приборе TEFA-6111. Определяли 7 макроэлементов и 7 микроэлементов (Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cr, Sr). В мелкозем всего выполнено 120 элементоопределений, а в железо-марганцевых конкрециях – 90.



**Рис. 1.** Схема геохимических катен. А – катена Ласьва, Б – катена Бекрята, В – катена Соболи. Разр. 1 – агрозем песчаный неоглеенный; разр. 2 – агрозем песчаный глееватый; разр. 3 – дерновая оподзоленная супесчаная глееватая почва; разр. 11 – агродерново-подзолистая тяжелосуглинистая неоглеенная почва; разр. 13 – агродерново-подзолистая тяжелосуглинистая глееватая почва; разр. 12 – агродерново-подзолистая тяжелосуглинистая глееватая почва; разр. 14 – темногумусово-глееватая тяжелосуглинистая почва; разр. 61 – агродерново-подзолистая неоглеенная почва; разр. 62 – агродерново-подзолистая глееватая почва, разр. 63 – агробурозем; разр. 64 – темногумусово-глееватая почва; разр. 65 – перегнойно-гумусово-глееватая почва.

*Определение контрастности кислотно-щелочных и редокс барьеров.* Геохимические барьеры нельзя рассматривать буквально как вертикально стоящую преграду на пути водной миграции элементов. Контрастность барьера будем выражать через градиент приращения характеристики среды ( $\Delta P$ ), нормированный по длине участка катены  $l$  (ее удобно выразить в метрах). Чем выше отношение  $\Delta P/l$ , тем выше контрастность геохимического барьера. При значении  $\Delta P/l$  ниже критического, говорить о геохимическом барьере нет смысла. Важно найти критические значения контрастности для этих двух видов геохимических барьеров.

Во всех геохимических классификациях кислотнo-щелочные и редокс (окислительно-восстановительные) барьеры ставят по значимости на первое место (Геохимические барьеры..., 2002; Перельман, Касимов, 1999). Подчеркнем важную особенность этих барьеров. Они не обязательно проявляются при кислотной и щелочной реакциях среды или в окислительной и восстановительной обстановках. Имеет значение также градиент рН и  $E_H$  в направлении водной миграции вещества (т.е. величина  $\Delta pH$  и  $\Delta E_H$ ). Так, щелочной барьер ( $\Delta pH > 0$ ) для некоторых катионов проявляется в кислотной обстановке, если она в пределах геохимической катены сменяет сильно-кислую. Это подтверждается лабораторными опытами по сорбции катионов тяжелых металлов (гидр)оксидами железа: сорбция Cu и Pb возрастает в 3-4 раза при увеличении рН с 4 до 5 (Водяницкий, Добровольский, 1998). То же относится к характеристике редокс барьеров. Приведем цитату. «Окислительный барьер может возникнуть и в условиях восстановительной среды, например, при смене резко восстановительной обстановки на восстановительную... (лишь бы увеличился  $E_H$ )» (Перельман, Касимов, 1999, с. 138).

Считается, что степень дифференциации элементов в почвенно-геохимических катенах сильнее зависит от величины редокс барьера, чем от кислотнo-щелочного барьера (Геохимические барьеры..., 2002). Очевидно, что такое заключение сделано на основе большей катенарной дифференциации  $E_H$ , чем рН. Исключения составляют автоморфные почвы, где высока эффективность щелочного барьера. Но сравнивать  $E_H$  и рН в почвенном растворе трудно, поскольку эти показатели имеют разную размерность. Поэтому приращение рН и  $E_H$  (мВ) в геохимической катене оценивают экспертно в бальной системе (Глазовская, 1997). Экспертную характеристику приращений рН и  $E_H$  желательнее заменить на количественную.

Для корректного сравнения контрастности этих барьеров значения  $E_H$ , выраженные в милливольтгах, представим через отрицательный логарифм активности электронов, безразмерный показатель  $pe$ . Значения  $pe$  можно сравнивать с рН (Водяницкий, 2006). Для температуры в 25°C пересчет  $E_H$  (мВ) в  $pe$  ведется по уравнению:  $pe = E_H : 58$  (Водяницкий, 2006).

Несмотря на чрезвычайную важность феномена контрастности геохимического барьера, каких-либо количественных показателей, позволяющих строго оценить, сколько и каких элементов может быть удержано в данной почве, не выработано. Признается, что разделение геохимических барьеров по контрастности и степени емкости ведется на интуитивном, экспертном уровне в зависимости от гранулометрического состава и гумусированности горизонта (Геохимические барьеры..., 2002). Попробуем эту проблему решить для кислотнo-щелочных и окислительно-

восстановительных барьеров на численном уровне, используя данные о полевых наблюдениях за режимом рН и редокс потенциала  $pe$ .

Выявлять тип барьера станем по знаку приращения физико-химического показателя в катене. При изучении кислотнo-щелочных и редокс барьеров будем опираться на следующие соображения. Положительные значения  $\Delta pH$ , взятые по катене по направлению миграции вещества, характеризуют щелочной барьер, а отрицательные – кислотный. Положительные значения  $\Delta pe$  характеризуют окислительный барьер, а отрицательные – восстановительный.

Теперь можно перейти к численной оценке контрастности барьеров. Их контрастность ( $h$ ) определяется величиной прироста рН или  $pe$  на единицу длины  $l$  изучаемого участка катены. Конкретно, в качестве  $l$  берется расстояние (м) между соседними разрезами в геохимической катене. Тогда контрастность кислотнo-щелочного барьера определена как:  $h(H) = \Delta pH/l$  с размерностью  $m^{-1}$ . Контрастность редокс барьера записывается как  $h(e) = \Delta pe/l$  с размерностью  $m^{-1}$ .

Какова же контрастность геохимических барьеров? Для ответа на этот вопрос используем режимные наблюдения за почвенным раствором в почвенно-геохимических катенах в среднем Предуралье. Рассмотрим усредненные за полевой сезон приращения  $\Delta pe$  и  $\Delta pH$  в пределах геохимических катен Ласва, Бекрята и Соболи, режимы которых были изучены ранее (Водяницкий и др., 2006; Гилев, 2007). В табл. 1 даны средние за теплый сезон значения рН и  $pe$ , полученные в двух верхних горизонтах почв. Здесь же приведены величины контрастности барьеров, исходя из того, что приращения  $\Delta pH$  и  $\Delta pe$  подсчитываются отдельно для каждого из генетических горизонтов при соблюдении условия примерно равенства их глубины в соседних разрезах. Оказалось, что абсолютно доминируют низкие значения  $h_{(H)} < |0.002| m^{-1}$  и  $h_{(e)} < |0.005| m^{-1}$ , отражая незначительные изменения физико-химических условий. Будем считать эти значения критическими  $h_{(H)кр} = |0.002| m^{-1}$  и  $h_{(e)кр} = |0.005| m^{-1}$ . Тогда значение  $h > h_{кр}$  говорит о контрастности геохимического барьера.

По условию  $h > h_{кр}$  выявлены щелочные ( $h_{(H)} > 0.002 m^{-1}$ ) и восстановительные ( $h_{(e)} < -0.005 m^{-1}$ ) барьеры. Оба типа барьеров характерны для глеевых почв. В катене Ласва оба барьера формируются в гумусовом горизонте глеевой почвы. При этом контрастность восстановительного барьера выше, чем щелочного. В катене Бекрята образуются щелочной и восстановительный барьеры в оглеенном гумусовом горизонте. В катене Соболи щелочной и окислительный барьеры не совпадают. Если щелочной барьер формируется в гумусовом горизонте темногумусовой глеевой почвы, то восстановительный барьер – в глеевом горизонте перегнойно-гумусовой глеевой почвы. При этом контрастность восстановительного барьера ( $-0.088 m^{-1}$ ) значительно выше контрастности щелочного ( $0.005 m^{-1}$ ).

**Таблица 1.** Средние значения pH и  $p_e$  почвенного раствора и контрастность геохимических барьеров  $h_{(H)}$  и  $h_{(e)}$  дерново-подзолистых почв

Почва, разрез	Горизонт	Глубина, см	Расстояние $l$ , м	pH	$h_{(H)}$	$p_e$	$h_{(e)}$	Тип барьера	
Дерново-подзолистых супесчаных почв, катена Ласья									
Неоглеенная, разр. 1	PY	0-34	–	5.5	–	10.4	–	Восстановительный Щелочной	
	EL	34-48		5.8	«	10.4	«		
Слабоглеевая, разр. 2	PY	0-31	350	4.5	«	11.2	«		
	EL	31-40	–	4.7	«	11.1	«		
Глеевая, разр. 3	AU	0-25	150	5.2	0.005	9.2	-0.013		
	EL	25-38		5.2	–	10.2	–		
Дерново-подзолистые тяжелосуглинистые почвы, катена Бекрята									
Неоглеенная, разр. 11	PY	0-30	–	5.2	–	10.3	–		
	ELBT	30-55		4.9	«	10.9	«		
Глееватая, разр. 13	PY	0-28	450	5.4	«	10.2	«		
	ELg <sup>//</sup>	28-42		5.5	«	8.8	«		
Глеевая, разр. 12	PY	0-30	350	4.9	«	10.7	«		
	EL	30-42		5.0	«	10.5	«		
Гумусово-глеевая, разр. 14	Aug <sup>//</sup>	6023	200	6.0	0.005	9.1	-0.008		
	G <sup>//</sup>	23-43		5.9		8.9			
Дерново-подзолистые тяжелосуглинистые почвы, катена Соболи									
Агро-дерново-подзолистая, разр. 61	PY	0-29	–	5.3	–	9.4	–		
	EL	29-40		5.0	«	10.1	«		
Агродерново-подзолистая глееватая, разр. 62	PYg	0-30	200	5.2	«	10.3	«		
	BELg	30-45		5.0	«	10.7	«		
Агробурозем, разр. 63	PY	0-31	1200	5.9	«	9.9	«		
	BM1	31-44		5.7	«	10.0	«		
Темногумусово-глеевая, разр. 64	AU	0-31	100	6.4	0.005	9.0	«		
	Bg	31-52		6.4		9.2	«		
Перегно-гумусово-глеевая, разр. 65	H	0-33	50	6.5	«	8.1	«		
	G	33-56		6.6	«	4.8	-0.088		

Примечание. Прочерк означает, что контрастность барьера ниже критической.

Геохимические модули закрепления микроэлементов Fe- и Mn-содержащими фазами-носителями. Одна из трех важнейших характеристик геохимического барьера – его устойчивость. Она во многом зависит от прочности закрепления микроэлементов фазами-носителями. Сложность состоит в том, что по мере накопления микроэлементов, прочность их закрепления снижается, и эффективность барьерных функций уменьшается настолько, что возможен «прорыв» барьера.

Оценка прочности закрепления тяжелых металлов и металлоидов основными фазами-носителями важна, так как от нее зависит поступление токсикантов в растения и грунтовую воду. В почвах главные фазы-носители поллютантов это – гумус, слоистые силикаты, гидроксиды железа и оксиды марганца. Гидроксиды железа и оксиды марганца как активные фазы-носители тяжелых металлов, мышьяка и фосфора определяют во многом их судьбу в загрязненных почвах, особенно, в составе ортштейнов и роренштейнов. Прочность их закрепления снижается пропорционально накоплению поллютантов на единицу массы носителя.

В наибольшей степени микроэлементы закрепляются Fe- и Mn-содержащими фазами-носителями в конкрециях, так как они обогащены как данными фазами-носителями, так и самими микроэлементами.

Ранее установлена приуроченность ряда микроэлементов к определенной почвенной фазе-носителю (Водяницкий, 2008). Это дает возможность предложить несколько геохимических модулей, характеризующих количество микроэлементов, приходящихся на единицу массы фазы-носителя. «Медный модуль» представляет собой молярное отношение Cu/Fe; «никелевый модуль» – Ni/Fe; «арсенатный модуль» – As/Fe; «фосфатный модуль» – P/Fe. Поскольку свинец имеет более сильное химическое сродство с медью, чем с железом, то «свинцовый модуль» имеет вид Pb/Mn. Модули рассчитываются на валовое содержание химических элементов в почве.

Очевидно, что с ростом модуля снижается прочность закрепления микроэлемента, соответствующей фазой-носителем. Так, очень высокое значение арсенатного модуля в песчаных осадках Бангладеш, Западной Бенгалии, Вьетнама, Монголии за счет малого содержания Fe, приводит к опасному загрязнению As питьевой воды, превышающего 20 ПДК (Pedersen et al., 2006). В одном из районов Бангладеш вместе с загрязненной мышьяком оросительной водой ( $397 \pm 7$  мкг/л As) ежегодно поступает в почву свыше 1000 т As. При этом содержание As в верхнем слое рисовых почв достигает 11-35 мг/кг (Roberts et al., 2007), что приводит к загрязнению риса.

Доказано, что прочность закрепления мышьяка Fe-содержащими минералами в обогащенных As отвалах резко снижается при возрастании арсенатного модуля свыше 250 (Paktung et al., 2003). Столь высокие значения модуля достигаются при совместном осаждении As и Fe из раствора. При

адсорбционном механизме закрепления As гидроксидами железа значение модуля значительно ниже.

Обратимся к почвам среднего Предуралья. В табл. 2 и 3 приведены значения модулей для роренштейнов алювиальных почв и ортштейнов дерново-подзолистых почв.

**Таблица 2.** Значения модулей закрепления микроэлементов Fe-содержащей фазой в роренштейнах аллювиальных почв, ммоль/моль

Пойма реки	Горизонт	Cu/Fe	Ni/Fe
Данилиха	AJg	10	18
Ива	G	4	6
Егошиха	G	3	13
Ласьва	C1g <sup>~</sup>	10	9
	C2g,h <sup>~</sup>	3	4
	C3g <sup>~</sup>	5	6
	C4g <sup>~</sup>	7	10
Мулянка	AJg	5	5
	C1g <sup>~</sup>	6	6
	G <sup>~</sup>	4	5

**Таблица 3.** Значения модулей закрепления микроэлементов Fe- и Mn-содержащими фазами в ортштейнах подзолистых почв, ммоль/моль

Горизонт	As/Fe	P/Fe	Pb/Mn
Агродерново-подзолистая неоглеенная почва			
PY	2	61	8
Агродерново-подзолистая глееватая почва			
ELg	2	19	10
Агродерново-подзолистая глеевая почва			
PY	2	17	6
ELg	2	9	9
BTg	3	8	4
Темногумусово-глеевая почва			
Aug	16	20	4
G <sup>//</sup>	13	22	3

В незагрязненных почвах в пойме р. Ива медный модуль составляет 4 ммоль Cu/моль Fe (фоновое значение). Близкие значения медного модуля (4-6) в аллювиальной почве в пойме р. Мулянка характеризуют прочное закрепление меди в роренштейнах. Но более высокие значения медного модуля (10) в загрязненных аллювиальных почвах рек Данилиха и Ласьва отражают менее прочное закрепление меди в роренштейнах.

Фоновое значение никелевого модуля составляет 6 ммоль Ni/моль Fe в (для почвы в пойме р. Ива). Близкие значения никелевого модуля (5-6) в аллювиальной почве в пойме р. Мулянка характеризуют прочное закреп-

ление никеля в роренштейнах. Но высокие значения медного модуля (13-18) в загрязненных аллювиальных почвах рек Данилиха и Егошиха отражают непрочное закрепление никеля в роренштейнах.

Фоновое значение арсенатного модуля в ортштейнах агродерново-подзолистых почв катены Бекрята составляет 2 ммоль As/моль Fe. Более высокие значения арсенатного модуля (13-16) в темногумусово-глеевой почве той же катены отражают менее прочное закрепление мышьяка в ортштейнах. Есть доказательства такой тенденции. Редукционное растворение лепидокрокита  $\gamma\text{FeOOH}$ , содержащего As, привело к более значительному высвобождению мышьяка в раствор при высоком арсенатном модуле (5 и 25), чем при низком (1) (Pedersen et al., 2006).

Фоновое значение фосфатного модуля (8 ммоль P/моль Fe) получено для ортштейнов агродерново-подзолистой глеевой почвы. Очень высокие значения фосфатного модуля (61) в неоглеенной почве той же катены отражают непрочное закрепление фосфора в ортштейнах.

Фоновое значение свинцового модуля составляет 3 ммоль Pb/моль Mn (для ортштейнов темногумусово-глеевой почвы). Более высокие значения свинцового модуля (8) в неоглеенной почве той же катены отражают непрочное закрепление свинца в ортштейнах.

Таким образом, медь и никель непрочно закрепляются в роренштейнах загрязненных аллювиальных почв.

На закрепление мышьяка, фосфора и свинца влияет степень гидроморфизма почв подзолистого ряда. Переувлажнение снижает прочность закрепления мышьяка в ортштейнах гидроморфных почв. Напротив, P и Pb непрочно закрепляются в ортштейнах автоморфных почв с преобладанием окислительного режима.

*Благодарность.* Автор выражает признательность А.А. Васильеву, М.Н. Власову, В.Ю. Гилеву, А.В. Кожевой и Э.Ф. Сагаеву, предоставивших сведения о свойствах почв.

## ВЫВОДЫ

1. При изучении кислотно-щелочного и редокс барьеров следует пере- считывать значения  $E_H$ , выраженные в милливольтгах, в безразмерный редокс потенциал  $pe$ . Значения  $pe$  можно сравнивать с pH.

Поскольку в геохимической катене характеристики среды изменяются плавно с различной степенью крутизны, то контрастность барьера предложено характеризовать через градиент приращения характеристики среды, нормированный по длине участка катены  $l$  (м). Тогда контрастность кислотно-щелочного барьера равняется:  $h_{(H)} = \Delta pH/l$  при превышении критического уровня  $|h_{(H)}| > 0.002 \text{ м}^{-1}$ . Контрастность редокс барьера определяется как:  $h_{(e)} = \Delta pe/l$  при  $|h_{(e)}| > 0.005 \text{ м}^{-1}$ .

В переувлажненных почвах среднего Предуралья выявлены щелочные ( $h_{(H)} > 0.002 \text{ м}^{-1}$ ) и восстановительные ( $h_{(e)} < -0.005 \text{ м}^{-1}$ ) барьеры. Оба барьера характерны для глеевых почв. В одной из катен контрастность восстановительного барьера в глеевой почве достигает  $0.088 \text{ м}^{-1}$ , что значительно выше контрастности щелочного ( $0.005 \text{ м}^{-1}$ ).

2. Предлагается несколько новых геохимических модулей, характеризующих степень закрепления микроэлементов железо- и марганец-содержащими фазами-носителями. Новые показатели включают «медный модуль» как молярное отношение  $\text{Cu/Fe}$ ; «никелевый модуль» –  $\text{Ni/Fe}$ ; «арсенатный модуль» –  $\text{As/Fe}$ ; «фосфатный модуль» –  $\text{P/Fe}$  и «свинцовый модуль» –  $\text{Pb/Mn}$ . С ростом модуля снижается прочность закрепления микроэлемента, соответствующей фазой-носителем. Установлены фоновые значения модулей. В конкрециях загрязненных почв Предуралья медный, свинцовый и никелевый модули превышают фоновые значения в 2.5-3 раза, а арсенатный и фосфатный модули – в 8 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Водяницкий Ю.Н.* Химия, минералогия и цвет оглеенных почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 170 с.

*Водяницкий Ю.Н.* Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах // *Агрохимия*. 2008. № 9. С. 87-94.

*Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Кожева А.В., Сатаев Э.Ф.* Особенности поведения железа в дерново-подзолистых и аллювиальных почвах Среднего Предуралья // *Почвоведение*. 2006. № 4 С. 396-409.

*Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В.* Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1998. 214 с.

*Гилев В.Ю.* Оксидогенез и редуктогенез в почвах на элювии и делювии пермских глин среднего Предуралья. Дис. ... к. с.-х. н. М., 2007. 138 с.

*Глазовская М.А.* Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 102 с.

Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / Под ред. Н.С. Касимова и А.Е. Воробьева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 394 с.

*Перельман А.И. Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 2000, 1999. 763 с.

Состояние и охрана окружающей среды Пермской области в 2004 году. Пермь, 2005. 25 с.

*Paktung D., Foster A., Laflamme G.* Speciation and characterization of arsenic in Ketz River mine tailings using X-ray adsorptoin spectroscopy // *Environ. Sci. Technol.* 2003. V. 37. P. 2067-2074.

*Pedersen H.D., Postma D., Jakobsen R.* Release of arsenic associated with the reduction and transformation of iron oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2006. V. 70. P. 4116-4129.

*Roberts L.C. Hug S.J., Dittmar J., Voegelin A., Saha G.C., Ali A., Badruz-zaman A.B.M., Kretzchmar R.* Spatial distribution and temporal variability of arsenic in irrigated rice fields in Bangladesh // *Environ. Sci. Technol.* 2007. V. 41. P. 5960-5972.