

УДК 910.3

ВЛИЯНИЕ НАВОДНЕНИЙ НА ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОТОКИ В ПОЧВАХ ДОЛИНЫ АМУРА

Махинов А.Н., Махинова А.Ф.

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, e-mail: amakhinov@mail.ru

В статье дана характеристика особенностей осадконакопления в пойме реки Амур во время прохождения крупных паводков. Описаны механизмы перераспределения элементов в пойменных почвах, уровни их концентраций и миграционная активность. Показана роль органического вещества наилков в процессах концентрирования химических элементов. Выявлены и проанализированы условия миграционной активности элементов и формирования почвенно-геохимических потоков в период прохождения катастрофического паводка 2013 года. Установлено, что миграционные потоки вещества характеризуются постоянством средних значений концентраций элементов и определенной частотой встречаемости зон их миграции. Дана классификация миграционных потоков для почв долины реки Амур. Предложены методы и алгоритмы оценки концентраций и миграционной активности элементов в почвенном пространстве и формирования геохимических потоков.

Ключевые слова: наводнение, миграционная активность элементов, геохимические потоки

FLOOD IMPACTS ON THE GEOCHEMICAL FLOWS IN THE SOILS OF RIVER VALLEY

Makhinov A.N., Makhinova A.F.

Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: amakhinov@mail.ru

The characteristic of deposition peculiarities in the Amur River flood plain during large-scale floods is given. The mechanism of elemental redistribution in floodplain soils, levels of their concentration and migration activity are described. The role of organic matter of deposit of spring floods in concentrating of elements processes is shown. The conditions of elemental migration activity and soil-geochemical fluxes formation during catastrophic flood of 2003 are revealed and analyzed. It was stated that migration flows of substance are characterized by constancy of average value of elemental concentration and definite frequency of their migration zone occurrence. The classification of migration flows for Amur River valley soils is given. The methods and algorithm of evaluation of elemental concentration and migration activity in soil and formation of geochemical fluxes are proposed.

Keywords: flood, elemental migration activity, geochemical fluxes

Катастрофические наводнения являются опасными природными угрозами и относятся к числу важнейших стратегических рисков России. На Амуре они обусловлены продолжительными интенсивными ливнями и случаются один раз в 20–25 лет. Уровень воды поднимается на 8–15 м, а скорость течения составляет 3–4 м/с. Наиболее высокие паводки отмечаются в Среднем и Нижнем Приамурье, на участках, где впадают Сунгари и Уссури. Подъем воды в Амуре и его основных притоках сопровождается высокой активностью русловых деформаций, размывом берегов и переотложением значительного объема терригенного материала на пойме [2]. Русловые процессы способствуют размыву почв, переносу и аккумуляции тонких фракций. Высокая активность русловых деформаций требует проведения берегозащитных и противопаводочных мероприятий.

Начиная с 2009 года, для реки Амур наступила фаза высокой водности, при которой происходит частое затопление поймы. Уровни подъема воды и русловые процессы

оказывают большое влияние на миграцию химических компонентов в почвенном пространстве его долины. Наибольшая миграционная активность элементов проявляется в период катастрофических паводков и зависит от гидрохимического состава воды, продолжительности и скорости прохождения паводочной волны. Паводковые воды растворяют микроэлементы в почвах и способствуют их миграции на большие расстояния. Негативные последствия этих природных явлений обостряют экологические проблемы. Они проявляются в изменении качества пойменных почв, загрязнении их химическими компонентами и снижении плодородия.

Особое влияние на формирование геохимических потоков оказывают заболоченные территории и сельскохозяйственные угодья. При затоплении болот водные потоки выносят большое количество органических веществ на сопредельные территории, которые способствуют процессам растворения и миграции элементов. Подтопление больших площадей промышленных зон

и сельскохозяйственных земель является причиной загрязнения почв тяжелыми металлами [3].

Однако закономерности осадконакопления в долинах рек и связанные с ним механизмы перераспределения химических элементов и формирование зон миграции изучены слабо. Раскрытие механизмов перераспределения концентраций элементов в почвах при наводнениях позволит оценить условия их миграционной активности.

Целью работы является комплексная оценка влияния наводнения и аллювиальных наносов на перераспределение химических элементов в почвах долины Амур.

Материалы и методы исследования

Исследованы особенности осадконакопления в пойме нижнего течения реки Амур при катастрофическом наводнении 2013 года. В качестве ключевых участков были выбраны пойменные острова Большой Усурийский, Славянский, Волчь-Бача, а также пойменные массивы в районах с. Малмыж и г. Комсомольск-на-Амуре. Изучались распространение, состав и мощность отложений, накопившихся на различных мезоформах пойменного рельефа за время паводка.

Разрабатываемые месторождения полезных ископаемых в долине Амура (Южно-Хинганское, Золотая гора и др.) рассматривались как геохимически аномальные районы, где подтопление во время крупных паводков способствует растворению определенных соединений и их миграции внутрипочвенным стоком на большие расстояния. В работе использованы методы сравнительного анализа полученных материалов и имеющихся опубликованных данных. Содержание химических элементов в отложениях поймы определяли методом спектрального анализа на спектроскане № 835 (Lif200). Определение количества общего углерода в почвах проводилось методом бихроматного окисления [1]. Для описания процессов миграции

химических компонентов использовались методы математического моделирования [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Водный режим и сток наносов. Река Амур имеет ярко выраженную многолетнюю изменчивость стока воды и наносов. Высокие (катастрофические) паводки, резкие сезонные колебания уровня воды и многорукавность русла контролируют миграционную активность элементов и интенсификацию почвенно-геохимических потоков в пойме. Максимальная скорость течения воды в Амуре в паводок 2013 г. достигала 4,0 м/с. Выход воды на пойму сопровождался уменьшением скорости до 1,5–2,0 м/с при глубине потока 1,5–2,5 м и интенсивной аккумуляцией наносов.

Наводнение активизирует процессы аккумуляции аллювия и переотложения наилкового материала. Основным объемом аллювиальных наносов в форме гряд и прирусловых валов, вытянутых вдоль направления водных потоков происходил в прибрежной части поймы (до 300 м от берега). Большая мощность аллювиального слоя на пойме (170 см) способствовала изменению пойменного рельефа и состава отложений, трансформации вещества в почвах.

Природные особенности водосборной площади реки обуславливают высокую мутность воды, связанную с содержанием большой массы наилкового материала, тонкодисперсных фракций ила и органического вещества. Наилковый материал скапливается в ложбинах и понижениях внутренних участков поймы (табл. 1) [2].

Таблица 1

Характеристика отложений поймы р. Амур, накопившихся в паводок 2013 г.

Характеристика поймы				Загопление поймы		Масса наносов, т/100м ²
Зоны накопления наносов	Форма рельефа	Средняя высота над урезом, м	Мощность аллювия, м	Глубина, м	Продолжительность, дни	
Прирусовая пойма до 10 м	Прирусовые валы	3–5	0,20–1,50	2–3	43	2700
Прирусовая пойма 10–300 м	Шлейфы	2–3	0,10–1,20	2–3	48	2040
	Ложбины	1–2	0,20–1,50	3–5	74	2180
Центральная пойма	Понижения	0,5–2	0,05–0,15	3–4	112	350
	Ложбины	0,5–1,5	0,10–0,30	4–5	98	760
	Основная часть поймы	2–3,5	0,01–0,02	3,5–4	67	2,5
	Гряды и релки	4–7	< 0,01	0,5–3	31	1,5

Таблица 2

Качественный состав наилка наводнения 2013 г. в пойме Амура

Район	рН	C _{орг.} , %	Уровни миграционной активности	Валовое содержание макро- и микроэлементов в наилках							
				%		в мг/кг					
				Fe	Mn	Ba	Zn	Pb	Cu	Co	Sr/ Ni
Остров Бол. Уссурийский	5,9	8,6	a {Ba,Pb,Zn,Mn	2,80	0,07	1578	59,90	28,30	1,70	19,3	299/10
	6,3	2,3	f {Fe,Mn,Sr,Co d {Ni,Cu,Ba,Co	1,41	0,04	1430	29,90	32,50	сл.	16,4	275/сл
Район Комсомольска-на-Амуре	6,0	4,1	a {Fe,Ba,Zn,Pb	4,16	0,07	1560	66,80	28,20	5,80	21,6	339/12
	6,2	2,1	f {Mn,Ni,Sr,Co d {Mn,Cu,Ni,Co	2,60	0,06	1410	54,50	27,20	1,50	15,5	298/9
Остров Волчи Бача	6,1	3,1	a {Fe,Mn,Ba,Pb	3,20	0,08	1630	72,30	32,30	7,80	30,0	299/16
	6,4	1,8	f {Pb,Mn,Zn,Sr d {Sr,Ni,Cu,Co,	1,30	0,04	1230	35,40	31,10	сл.	19,0	192/сл
Кларки элементов (литосф.) Виноградов, 1962				4,65	0,85	650	50	10	20	80	340/58

Примечание. C_{орг.} определено по методу И.В. Тюрина в наилках (аналитик С.И. Левшина); валовое содержание макро- и микроэлементов – на спектрокане № 835 (Lif200) (аналитик К.В. Уткина).

Наилки оказывают влияние на физико-химические свойства почв. Разложение биомассы наилок способствует образованию агрессивных фракций фульвокислот, которые выщелачивают первичные минералы с образованием полуторных окислов (R₂O₃) и органо-минеральных соединений. При высоких концентрациях оксидов железа (Fe₂O₃) происходит их сегрегация в железистые конкреции [4, 7]. Длительность паводка, высокое содержание терригенного материала интенсифицируют процессы трансформации вещества в почвах и миграционную активность элементов, способствуют возникновению геохимических потоков в почвенном пространстве.

Геохимические преобразования в почвах. Состав наилок и продолжительность затопления поймы оказывают влияние на массообмен и перераспределение концентраций элементов в приповерхностных горизонтах почв. Изменчивость концентраций элементов в почвах поддерживает процессы саморегуляции регионального геохимического фона территории. Пространственное распределение элементов в природных системах подчиняется законам термодинамики и направлено в сторону наименьших концентраций.

Уровни концентраций элементов оценивались по коэффициентам их концентраций относительно фона в слое 0–30 см (*K_j*), определяемых как отношение концентраций элементов в почвах к их содержанию в почвообразующей породе [4]. Выделено 3 типа уровней концентраций элементов:

1) *a* – уровни накопления элементов (*K_j* > 1,1);

2) *f* – уровни соответствия концентраций элементов их региональному фону (0,7 < *K_j* < 1,1);

3) *d* – уровни дефицита элементов (*K_j* < 0,7).

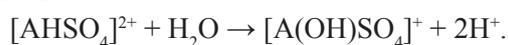
Уровни концентраций элементов в почвенном пространстве определяют состояние их рассеяния и функционально согласуются с их миграционной активностью и почвенно-геохимическими потоками [3].

Геохимические преобразования в почвах контролируются процессами окисления, обмена и явлениями сорбции, способствующими формированию зон концентраций элементов и геохимических потоков [3]. Анализ полученного материала указывает на обогащение почвенного пространства некоторыми микроэлементами (Ba, Pb, Zn, Fe, Mn) и их существенную связь с содержанием органического вещества в наилках (табл. 2).

Эффективность геохимических преобразований контролируется содержанием фоновообразующих элементов в почвенном пространстве и суммарным потенциалом тонких фракций органического вещества, привнесенного с наилками.

Геохимический фон территории бассейна Амура образуют железо и марганец, который поддерживают многочисленные месторождения железисто-марганцевых руд, в период паводка в долинах рек он может нарушаться [4]. При сильном разбавлении почвенных растворов паводковыми водами неоднородность разложенного органического

го вещества предполагает различные стадии диссоциации органических кислот в почве [5]. В этих условиях фоновообразующие элементы проявляют различные свойства и по-разному взаимодействуют с молекулами почвенного раствора. Например, при невысокой концентрации водородных ионов ($pH > 6,0$) механизмы помимо ионного обмена могут приобретать окислительный характер. Чаще всего процессы окисления и сорбции проявляются на коллоидно-дисперсных наилках с образованием комплексных катионов $[FeHSO_4]^+$, $[FeHSO_4]^{2+}$, $[CuHSO_4]^+$, которые при большой продолжительности наводнения могут испытывать гидролизные превращения по схеме



Важно отметить, что избыток воды в почве способствует диссоциации соединений макроэлементов с проявлением их низшей валентности Fe^{+2} и $Mn^{+2(+5)}$. Находясь в гидратированном состоянии с увеличением концентраций водородного иона ($pH < 5,5$), железо и марганец способны к образованию комплексных гетерополярных солей. Эти явления обычно возникают в верхнем обводненном слое почв, в присутствии растворимых органических кислот наилкового аллювия. Углеродсодержащие центры растворимых органических кислот связывают Fe^{+2} и $Mn^{+2(+5)}$ в органо-минеральные комплексы, понижая их концентрацию в почвенном растворе.

Изменение концентраций фоновообразующих элементов Fe и Mn влияет на буферность раствора и интенсификацию процессов растворения некоторых соединений, содержащих медь, свинец, цинк с образованием катионов Cu^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} . Однако количественное распределение элементов в почвах трудно объяснить, сравнивая только эффекты зарядов катионов, потенциалы ионизации и радиусы атомов или изменение степени их литофильности. Установлено, что длительность паводка по времени (> 10 дней) снижает прочность органо-минеральных соединений, повышает буферность почвенного раствора и интенсификацию процессов ионного обмена ряда элементов, что согласуется с их миграционной активностью (табл. 2). Учитывая, что большинство элементов в природе находится в связанном состоянии, ионная растворимость соединений и диссоциация солей зависят от содержания кислорода, pH и температурного режима паводковых вод.

На распределение элементов в почвенном пространстве определенную роль играют за-

болоченные территории. В болотных водах долины Амура отмечается высокое содержание органических взвесей и растворимых форм органо-минеральных соединений железа и марганца, которые в период наводнения выносятся на сопредельные территории. В наилках, содержащих органические коллоиды на поверхности дисперсных глинистых минералов, происходит изоморфное гетеровалентное замещение Mn^{+7} , $Al^{+3} \rightarrow Fe^{+3}$ с образованием слабого заряда на поверхности [7]. При больших концентрациях взвесей и температуры воды более 20° , в приповерхностном обводненном слое, постоянно отталкивающиеся отрицательно заряженные диспергированные частицы способствуют сольватации элементов и дальнейшей их сорбции на отрицательно заряженных микрочастицах [3]. Явление «сольватация \rightarrow сорбция» приводит к повышению концентрации полиэлементов в верхних слоях аккумулятивных отложений. При высоких значениях водородного иона ($pH < 5$) органические кислоты вступают в реакции ионного обмена [5]. В многокомпонентных почвенных растворах соотношение органических кислот и различных форм макроэлементов (Fe^{2-3} , Mn^{2-5-7}) определяет миграционную активность многих элементов и создаёт условия для дифференциации почвенно-геохимических потоков.

Формирование почвенно-геохимических потоков. Распределение концентраций элементов в почвенном пространстве является косвенным показателем состояния миграционных потоков. Оно характеризуется:

- а) постоянством средних значений концентраций элементов;
- б) частотой встречаемости почвенно-геохимических зон миграции и разнообразием миграционных потоков;
- в) определенными рядами миграционной активности элементов, соответствующих почвенно-геохимическим зонам миграции;
- г) различным составом элементов и уровнями их миграции (*a-f-d*).

Миграционная активность элементов определяет состав почвенно-геохимических потоков, а частота их встречаемости – геохимические зоны миграции. Интенсификация геохимических потоков в почвах и вынос растворенных веществ при невысокой сорбции подчиняется закону гравитационной силы [6]:

$$F_g = p_b g h = [p_b (W - W_m) (W_p - W_m) z g / L] (\sin \alpha) = [M g / L] (\sin \alpha),$$

где F_g – гравитационные силы миграционных потоков; p_b – плотность почвы;

g – ускорение силы тяжести; h и W высота и влажность почвы; W_p и W_m – полная и максимальная влагоемкость почвы; M – запасы подвижной влаги; L – активная пористость; z – координата; $\sin\alpha$ – уклон поверхности. Уравнение можно использовать для расчетов и анализа распределения элементов в профиле почв.

Геохимические потоки осуществляют массоперенос растворимых веществ и диспергированных фракций наилкового материала по поровому пространству почв, называемой «транспортной зоной». Движение почвенных растворов контролируется условиями водной миграции:

$$J_m f(V_c) = [F_g(M/L)C_m p_b \sin\alpha],$$

где J_m – интенсивность массопереноса, $f(V_c)$ – скорость передвижения почвенного раствора по поровому пространству, C_m – общая концентрация элементов в почвенном растворе.

Обогащенные почвенные растворы фильтруются в двух направлениях: а) нисходящие потоки и 2) боковые, обусловленные образованием напора наклонной поверхности. Распределение концентраций химических элементов (C_{ji}) в почвенном пространстве можно характеризовать функцией координат пространства и времени:

$$\sum_j^n C_{ji} = \sum_j^n k_{ji} f(x, y, z, t).$$

В условиях непрерывного безнапорного режима фильтрации почвенного раствора распределение концентраций элементов ($\sum_j^n C_{ji}$) в почвенном пространстве, разделенных расстоянием (r), можно описать уравнением неразрывности:

$$D_U(rt) \sum_j^n C_{jr} \leq [U_i(x+r) - U_i(x)]^2 \hat{t} = \\ = (\text{grad} C_{ji})_r \hat{t},$$

где $D_U(rt) \sum_j^n C_{jr}$ – характеристика почвенного раствора в определенном объеме точки r в момент времени \hat{t} , на бесконечно малом расстоянии (r), условно считаем, что температурный градиент $t^0 - \text{const}$.

Транспортирующая способность геохимического потока является функцией основных характеристик почвы и рельефа. Зона миграции элементов определяется рядами активности элементов, перешедших в раствор, и для различных соединений неодинакова [3]. При напорном боковом движении насыщенного почвенного раствора концентрация элементов в определенных

условиях возрастает, в рядах их миграционной активности происходит «перестройка». Например, миграционная активность элементов в ряду (точка m_1) $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{Ni}$ снижается, и в точке m_2 наблюдается другой ряд геохимической активности – $\text{Al} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Ni}$ или $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Co}$ [2].

Таким образом, каждый тип миграционного потока характеризуется определенной неоднородностью элементов, соответствующих уровням их активности и определяемым степенью отклонения концентраций элементов от средних значений фона. Анализ условий осадконакопления и содержания взвешенных и растворимых форм элементов в пойме Амура во время паводка 2013 года позволил выделить 4 типа миграционных потоков:

1 – аккумулятивные, обусловленные накоплением наилок в центральных частях пойменных массивов;

2 – золово-аккумулятивные, связанные с накоплением преимущественно песчаного терригенного материала в приустьевой части;

3 – аквапотоки, действующие во время наводнения;

4 – почвенно-геохимические потоки вещества в составе почвенного раствора.

Выделенные типы миграционных потоков согласуются с геохимическими процессами в почвах, частота их встречаемости связана с миграционной активностью элементов, которые определяют границы зон их миграции.

Исследованные почвенно-геохимические потоки поддерживают годовой геохимический цикл и характеризуются неоднородностью в пространстве и нестационарностью во времени. Состояние геохимических потоков определяет распределение элементов в почвенном пространстве.

Заключение

Перераспределение элементов в почвах долины Амура в период наводнения контролируется их миграционной активностью и межфазными взаимодействиями почв. Основными факторами геохимического преобразования в почвах являются:

а) содержание фоновообразующих элементов группы железа и концентрация водородного иона в почвенном растворе;

б) особенности осадконакопления и длительность паводка, определяющие интенсивность трансформации вещества и механизмы формирования геохимических потоков;

в) количество и качество органического вещества наилков.

Оценка условий концентрации и миграционной активности элементов в почвах долины Амура позволила выделить 4 типа миграционных потоков, обусловленных процессами аккумуляции аллювия, плоскостного смыва и перераспределением вещества в составе почвенных растворов.

Разнообразие геохимических потоков в почвах характеризуется постоянством средних значений концентраций элементов и частотой встречаемости зон миграции, а также определенными рядами миграционной активности элементов, соответствующих различным уровням миграции (*a-f-d*).

Работа выполнена при поддержке проекта № 15-1-6-061 РФФИ – ДВО РАН.

Список литературы

1. Бельчикова Н.П. Определение гумуса почв по методу И.В. Тюрина // *Агрохимические методы исследования почв*. – М.: Наука, 1975. – С. 56–62.
2. Махинов А.Н., Лю Шугуан. Формирование рельефа русел и берегов рек. – Хабаровск: ДВО РАН, 2013. – 174 с.
3. Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // *Химия и жизнь*. – 2008. – № 1. – С. 50–55.
4. Смагин А.В. Теория и методы оценки физического состояния почв // *Почвоведение*. – 2003. – № 3. – С. 328–341.
5. Makhinova A.F., Makhinov A.N., Kuptsova V.A., Liu Shuguang, Yermoshin V.V. Landscape-Geochemical Zoning of the Amur Basin (Russian Territory) // *Journal of Pacific Geology*. – 2014. – Vol. 33. № 2. – P. 76–89.
6. Makhinova A.F., Makhinov A.N., Kuptsova V.A., Yermoshin V.V. Geochemical differentiation of soil in the Amur Basin (Russian Part) // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2013. – Vol. 45, № 6. – P. 89–98.
7. Senesi N., Loffredo E. Metal Iron Complexation by Soil Humic Substance // *Chemical Processes in Soils*. Madison: Soil Science Society of America, 2005. – P. 563–617.