

## Редкоземельные элементы в аллювиальных почвах поймы р. Амур: влияние катастрофического паводка 2013 г.\*

*А. В. Мартынов*

Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
Российская Федерация, 675000, Благовещенск, пер. Релочный, 1

Для цитирования: Мартынов А. В. Редкоземельные элементы в аллювиальных почвах поймы р. Амур: влияние катастрофического паводка 2013 г. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 2. С. 160–177. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.203>

Изучено влияние катастрофического паводка 2013 г. на валовое содержание и подвижную фракцию редкоземельных элементов (РЗЭ) в аллювиальных почвах прирусловой поймы в среднем течении р. Амур. Охарактеризованы отношения между РЗЭ, почвенными свойствами и макроэлементным составом до и после паводка. Содержание РЗЭ определено при помощи метода масс-спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Для статистического анализа данных использован корреляционный анализ. Установлено, что содержание РЗЭ в почве увеличивается по мере удаления от русла реки и утяжеления гранулометрического состава. До паводка 2013 г. содержание РЗЭ валовой формы варьирует от 70 до 170 мг/кг, подвижной формы — от 1 до 11 мг/кг. Аккумуляция РЗЭ в исследуемых аллювиальных почвах преимущественно обусловлена глинистыми минералами. На подвижность лантаноидов сильно влияют реакция среды и окислительно-восстановительный потенциал. Паводок привел к накоплению РЗЭ в почвах. В среднем содержание валовой формы увеличилось на 10 %, подвижной — на 70 %. Характер влияния паводка на содержание лантаноидов определяется пойменным рельефом. После паводка наблюдается улучшение коэффициентов корреляции с органическим веществом и оксидами фосфора.

*Ключевые слова:* аллювиальные почвы, редкоземельные элементы, масс-спектроскопия, паводок, р. Амур, корреляционный анализ.

### Введение

Почти во всех публикациях, посвященных редкоземельным элементам (РЗЭ) в почвах, делается акцент на первостепенном влиянии исходного состава почвообразующей породы на содержание в ней РЗЭ. Фактически, несмотря на разнообразие природных условий в различных типах зональных почв, формирующихся на схожих материнских породах, содержания РЗЭ будут сопоставимы, т. е. содержание РЗЭ в незагрязненных почвах определяется их концентрацией в почвообразующей породе (Кожевникова и Ермаков, 2010; Переломов, 2007; Tyler, 2004). Но в качестве субстрата для материнской породы в аллювиальных почвах служат

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант № 18-05-00151 А).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

гомогенизированные и отсортированные в ходе флювиального воздействия продукты разрушения различных горных и осадочных пород со всей территории бассейна реки (Шраг, 1969). Эти продукты разрушения могут переноситься рекой на значительные расстояния, откладываясь на различных участках поймы, зачастую неравномерно и на протяжении реки, и на территории поймы во время паводков, что может привести к геохимическим аномалиям.

К фактам возможного накопления РЗЭ в аллювиальных почвах относится и то, что пойма выполняет функции латерального барьера в отношении веществ, мигрирующих с постоянными и временными, поверхностными и внутрипочвенными водотоками с террас (Перельман и Касимов, 2000). Также для лантаноидов, находящихся в водной среде (что актуально для зачастую гидроморфных почв поймы), характерно химическое фракционирование, формирующее необычные соотношения — лантаноидные аномалии, под которыми понимают сильное отличие нормированного содержания данного лантаноида от нормированного содержания его соседей в периодической системе (Vodyanitskii, 2012). Поэтому аллювиальные почвы являются уникальным объектом для исследований содержания, распределения и поведения РЗЭ.

Целесообразность изучения РЗЭ также связана с их широким спектром использования. Они активно применяются во многих промышленных технологиях, а также в качестве микроэлементных удобрений или кормовых добавок в сельском хозяйстве (Hu, et al., 2006). Это привело к резкому увеличению спроса на РЗЭ за последние годы. Например, в 2010 г. было добыто около 130 тыс. т РЗЭ, что в 20 раз выше спроса на них в 1997 г. (Mineral commodity..., 2011). Интенсивное использование РЗЭ в промышленности и в сельском хозяйстве привело к их значительному поступлению в окружающую среду, а почвы являются естественным поглотителем РЗЭ. В результате аллювиальные почвы многих рек загрязнены промышленными, муниципальными, коммунальными и сельскохозяйственными отходами, содержащими РЗЭ (Du Laing, et al., 2009; Rinklebe, et al., 2007). В дальнейшем из-за ремобилизации, транспорта и перераспределения элементов такие почвы могут служить источником загрязнения для территорий, расположенных ниже по течению (Förstner, 2004).

Отдельно отметим, что вопросам содержания РЗЭ не только в аллювиальных, но и в зональных почвах российскими исследователями уделяется очень мало внимания. Из публикаций по данной тематике выделяются работы (Водяницкий, 2012; Кожевникова, 2010; Кожевникова и Ермаков, 2010; Переломов, 2007; Vodyanitskii, 2012). Данные о содержании РЗЭ в почвах Амурской обл. можно найти только в работах (Брянин и Сорокина, 2015; Сорокина и Гусев, 2014; Sorokina and Zarubina, 2013).

Таким образом, цель данного исследования — определить содержание РЗЭ и изучить влияние почвенных свойств на их поведение в аллювиальных почвах поймы р. Амур до и после паводка 2013 г. — крупнейшего паводка за последние 30 лет (Verbitskaya, et al., 2015).

## **Объект и методы исследования**

В качестве объекта исследования для оценки влияния паводка на содержание и распределение РЗЭ в аллювиальных почвах поймы среднего течения р. Амур выбран ключевой участок, расположенный между селами Куприяново и Калинино,

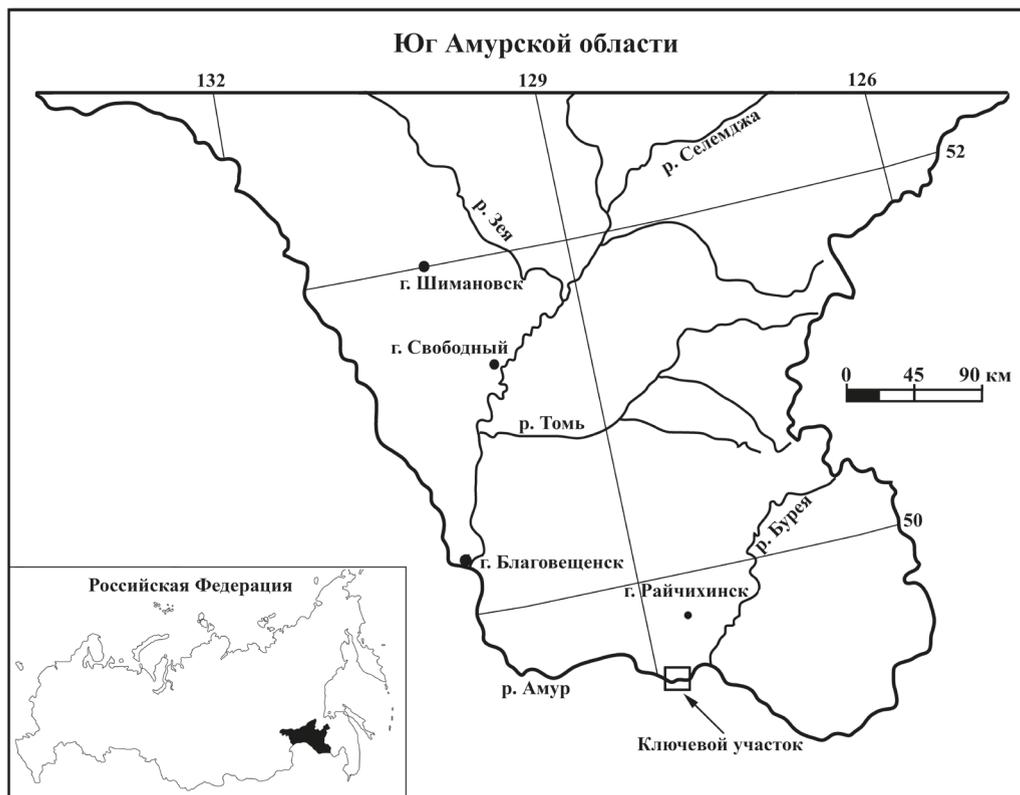


Рис. 1. Расположение ключевого участка (показан стрелкой) на территории Амурской обл.

в районе р. Рыбной (рис. 1). Такой выбор обусловлен проведением в данном районе детальных почвенных исследований с отбором почвенных проб, проведенных за два года до паводка, что позволяет сравнить содержание РЗЭ до него и после.

В ходе экспедиции 2014 г. установлено, что в зону затопления паводковыми водами попали три заложённых в 2011 г. почвенных разрезов, расположенных в пределах прирусловой поймы. Образцы почв из разрезов отбирались по генетическим горизонтам: восемь образцов — до паводка, девять — после паводка.

В отобранных почвенных образцах были определены следующие показатели: гранулометрический состав — методом пипетки по Н. А. Качинскому; потенциальная кислотность — потенциометрическим методом; обменная кислотность — методом А. В. Соколова; обменный кальций и магний — комплексометрическим методом по К. К. Гедройцу; органический углерод — методом мокрого озоления по И. В. Тюрину (Аринушкина, 1970; Новицкий и др., 2009).

Определение валовых и подвижных форм РЗЭ было выполнено методом масс-спектрологии с индуктивно-связанной плазмой в аналитическом центре коллективного пользования на базе ДВГИ ДВО РАН под руководством науч. сотр. Н. В. Зарубиной.

Для извлечения подвижных форм элементов использован ацетатно-аммонийный буфер с  $pH = 4,8$ . Навеску пробы массой 5 г заливали буферным раствором

и оставляли на сутки при комнатной температуре. За время контакта пробы с раствором ее 7 раз быстро перемешивали. Полученные растворы минерализовали в микроволновой печи MARS-5 с азотной кислотой (CEM Corporation, USA), чтобы удалить из них органические вещества и повысить чувствительность определения. Анализ на широкий спектр элементов выполнен на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7700x (Agilent Technologies, Япония).

Чтобы определить валовые содержания элементов, требовалось разложить исследуемые образцы и перевести их в раствор. Для этого применяли метод открытого кислотного разложения в смеси кислот HF, HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> в соотношении 2,5 : 1,0 : 0,5. Навеска пробы составляла 0,05 г. Концентрации элементов измерены на ИСП-МС-спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, Япония). Правильность результатов определения подтверждена анализом стандартных образцов JR-1 и JB-3 (Геологическая служба Японии). Среднеквадратические отклонения результатов определения не превышали 10–15 %, что соответствует критериям качества выполнения количественного элементного анализа, принятым в геохимических исследованиях.

Для выявления закономерностей между содержанием микроэлементов, макроэлементов и свойствами аллювиальных почв использован корреляционный анализ методом Пирсона. Так как часть данных характеризовалась ненормальным распределением, данные были стандартизированы. Статистическая обработка данных проведена в программе Statistica v.6.0.

## Результаты и обсуждение

По классификации почв России (Шишов и др., 2004) исследуемые аллювиальные почвы относятся к двум отделам:

- 1) аллювиальных почв — в него входят аллювиальная серогумусовая (АСГ) и аллювиальная серогумусовая глееватая почва (АСГг),
- 2) слаборазвитых почв — в него входит аллювиальная слоистая почва (АС).

Паводок 2013 г. вызвал значительные изменения в физико-химических и химических свойствах этих почв и в их макроэлементном составе (табл. 1 и 2). Часть почв, сформированных недалеко от русла, оказалась перекрытой слоем аллювия мощностью до 30 см (Мартынов, 2016). Подобные изменения не могли не сказаться на содержании РЗЭ в почве (табл. 3 и 4).

Исследований, посвященных содержанию РЗЭ в аллювиальных почвах, недостаточно, чтобы определить средние значения этого показателя, позволяющие использовать их как эталон. Поэтому, чтобы оценить содержание РЗЭ в исследуемых аллювиальных почвах, в работе выполнено их нормирование к верхней континентальной коре (ВКК) по данным работы (Rudnick and Gao, 2004) (рис. 2) и к их среднему содержанию в почвах Китая по данным работы (Kabata-Pendias, 2011) (рис. 3). Выбор нормирования к ВКК связан с генезисом аллювиальных почв. Аллювий, на котором они формируются, представляет собой усредненный в ходе флювиального воздействия субстрат, образующийся преимущественно в результате выветривания горных и осадочных пород ВКК, слагающих территорию речной сети. Выбор

Таблица 1. Свойства аллювиальных почв до (числитель) и после (знаменатель) паводка

Почва	Горизонт	Глина, %	pH <sub>KCl</sub>	C, %	Ca + Mg, мг-экв	H + Al мг-экв
Аллювиальная слоистая	W	6/4	6,2/5,2	1,0/0,6	5,33/2,58	0,03/0,02
	C	4/3	5,9/4,8	0,03/0,06	0,58/1,84	0,02/0,01
Аллювиальная серогумусовая	AУ1	8/7	5,4/5,0	1,3/0,9	5,94/5,39	0,06/0,03
	AУ2	12/8	4,1/4,0	0,9/0,8	4,31/4,53	0,49/0,60
	C	15/10	3,9/4,3	0,60/0,07	2,43/1,47	1,00/0,16
Аллювиальная серогумусовая глееватая	AУ	20/22	7,3/4,5	11,3/5,3	16,49/17,15	0,04/0,87
	Cg1	12/13	4,7/3,8	2,3/1,9	13,51/9,44	0,18/4,22
	Cg2	13/14	4,3/3,9	1,7/1,8	9,37/6,98	0,53/3,11

Таблица 2. Макроэлементный состав аллювиальных почв до и после паводка

Тип почвы	Горизонт	Si <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<i>До паводка</i>											
Аллювиальная слоистая	W	72,54	0,77	11,59	4,58	0,13	3,17	0,6	1,7	3,98	0,32
	C	72,44	0,83	10,77	5,43	0,14	2,96	0,58	1,53	4,72	0,21
Аллювиальная серогумусовая	AУ1	69,2	1,02	12,47	6,69	0,18	2,9	0,72	1,56	4,14	0,32
	AУ2	69,97	1,01	13,14	6,79	0,18	2,11	0,71	1,54	3,52	0,26
	C	68,85	1,07	13,92	7,17	0,12	1,91	0,74	1,57	3,61	0,32
Аллювиальная серогумусовая глееватая	AУ	64,19	0,81	13,1	4,76	0,38	6,47	1,21	1,36	2,96	0,77
	Cg1	66,38	0,99	15,82	7,17	0,18	1,78	1,16	2,02	2,96	0,24
	Cg2	67,99	0,77	15,93	6,26	0,14	1,57	1,14	2,17	2,76	0,26
<i>После паводка</i>											
Аллювиальная слоистая	W	71,48	0,95	11,22	5,61	0,14	3,18	0,57	1,74	4,31	0,27
	C	75,4	0,56	10,06	3,85	0,1	2,56	0,48	1,7	4,89	0,12
Аллювиальная слоистая	AУ1	70,72	0,92	12,16	6,21	0,16	2,72	0,67	1,6	3,95	0,26
	AУ2	68,83	1,11	13,57	7,57	0,16	1,99	0,72	1,39	3,5	0,27
	C	72,63	0,75	11,61	4,93	0,13	2,1	0,56	1,8	4,45	0,19
Аллювиальная серогумусовая глееватая	AУ	66,72	1,01	14,77	7,15	0,21	4,94	0,98	1,74	2,96	0,31
	Cg1	66,8	0,94	17,31	6,56	0,1	1,07	1,12	1,99	2,59	0,23
	Cg2	64,99	1,02	16,97	5,89	0,14	1,09	1,04	1,78	2,68	0,28

Таблица 3. Валовое содержание РЗЭ в аллювиальных почвах до и после паводка, мг/кг

Тип почвы	Горизонт	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		До паводка													
Аллювиальная слоистая	W	21,71	47,47	5,17	19,16	3,42	0,82	2,58	0,39	2,06	0,39	1,14	0,16	1,07	0,15
	C	12,76	28,77	3,44	12,96	2,42	0,65	1,94	0,29	1,53	0,29	0,83	0,12	0,77	0,11
Аллювиальная серогумусовая	AY1	28,58	61,34	6,81	24,96	4,22	0,99	3,23	0,48	2,58	0,48	1,41	0,20	1,30	0,19
	AY2	25,31	52,65	5,65	20,61	3,60	0,83	2,93	0,45	2,36	0,46	1,29	0,19	1,20	0,17
Аллювиальная серогумусовая глееватая	C	27,34	59,20	5,91	20,85	3,51	0,79	2,73	0,41	2,07	0,39	1,16	0,16	1,09	0,16
	AY	35,50	68,60	7,23	26,51	4,81	0,94	4,25	0,63	3,30	0,62	1,78	0,25	1,57	0,22
Аллювиальная серогумусовая глееватая	Cg1	37,24	77,67	8,17	29,84	5,57	1,13	4,67	0,71	3,78	0,75	2,16	0,30	1,95	0,28
	Cg2	33,44	70,24	7,45	27,49	4,97	1,05	4,21	0,61	3,14	0,62	1,75	0,25	1,56	0,23
После паводка															
Аллювиальная слоистая	W	25,82	54,37	6,15	22,12	3,72	1,04	3,26	0,41	2,09	0,4	1,17	0,16	1,04	0,16
	C	15,35	32,31	3,85	14,16	2,57	0,76	2,25	0,31	1,57	0,31	0,85	0,12	0,74	0,11
Аллювиальная серогумусовая	Пойменный аллювий	12,14	26,75	3,17	11,87	2,27	0,71	2,05	0,28	1,48	0,29	0,82	0,11	0,74	0,10
	AY1	27,02	55,72	6,31	23,03	4,13	1,05	3,69	0,50	2,54	0,49	1,44	0,20	1,30	0,18
Аллювиальная серогумусовая	AY2	28,00	53,91	5,75	20,02	3,50	0,91	3,25	0,43	2,23	0,44	1,25	0,17	1,11	0,16
	C	21,06	46,61	4,92	17,94	3,34	0,95	3,04	0,41	2,18	0,42	1,19	0,16	1,08	0,15
Аллювиальная серогумусовая глееватая	AY	33,53	69,42	7,55	27,15	5,05	1,09	4,66	0,63	3,32	0,64	1,84	0,25	1,65	0,24
	Cg1	40,19	83,49	8,88	32,36	6,65	1,32	5,60	0,75	4,02	0,78	2,20	0,31	1,96	0,28
Аллювиальная серогумусовая глееватая	Cg2	47,14	97,08	10,47	38,17	7,05	1,52	6,61	0,89	4,67	0,91	2,57	0,36	2,26	0,33

Таблица 4. Содержание РЗЭ подвижной формы в аллювиальных почвах до и после паводка, мг/кг

Тип почвы	Горизонт	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		До паводка													
Аллювиальная слоистая	W	0,178	0,297	0,039	0,169	0,036	0,007	0,034	0,005	0,024	0,004	0,011	0,001	0,006	0,001
	C	0,275	0,280	0,060	0,244	0,049	0,010	0,045	0,006	0,033	0,006	0,016	0,002	0,011	0,002
Аллювиальная серогумусовая	AУ1	0,383	0,630	0,088	0,372	0,079	0,015	0,072	0,010	0,050	0,009	0,022	0,002	0,014	0,002
	AУ2	1,570	2,916	0,387	1,648	0,329	0,063	0,298	0,044	0,219	0,040	0,101	0,012	0,066	0,010
Аллювиальная серогумусовая глееватая	C	1,776	3,158	0,423	1,778	0,349	0,068	0,316	0,047	0,236	0,043	0,107	0,012	0,069	0,010
	AY	0,690	1,206	0,151	0,666	0,132	0,025	0,121	0,017	0,086	0,016	0,039	0,004	0,022	0,003
	Cg1	2,027	4,370	0,521	2,268	0,472	0,088	0,421	0,063	0,320	0,059	0,148	0,017	0,097	0,014
	Cg2	1,991	4,420	0,514	2,220	0,459	0,086	0,410	0,062	0,319	0,060	0,153	0,018	0,103	0,016
После паводка															
Аллювиальная слоистая	W	0,395	0,769	0,093	0,387	0,082	0,016	0,075	0,011	0,055	0,01	0,025	0,003	0,017	0,002
	C	0,553	1,029	0,128	0,474	0,091	0,016	0,08	0,012	0,059	0,011	0,029	0,003	0,021	0,003
Аллювиальная серогумусовая	Пойменный аллювий	0,913	1,709	0,223	0,907	0,165	0,031	0,150	0,021	0,109	0,020	0,054	0,007	0,039	0,006
	AУ1	0,590	0,942	0,137	0,530	0,110	0,022	0,102	0,015	0,073	0,013	0,032	0,004	0,021	0,003
	AУ2	1,881	3,048	0,451	1,903	0,376	0,073	0,344	0,051	0,255	0,047	0,118	0,013	0,076	0,011
	C	1,853	1,029	0,332	1,212	0,196	0,037	0,169	0,027	0,138	0,024	0,060	0,007	0,037	0,005
Аллювиальная серогумусовая глееватая	AY	1,776	3,158	0,423	1,778	0,349	0,068	0,316	0,047	0,236	0,043	0,107	0,012	0,069	0,010
	Cg1	2,898	6,502	0,753	3,210	0,695	0,127	0,624	0,089	0,474	0,084	0,210	0,024	0,137	0,020
	Cg2	7,758	0,909	3,877	0,827	0,150	0,738	0,112	0,573	0,102	0,256	0,167	0,025	0,025	0,025
		7,758	0,909	3,877	0,827	0,150	0,738	0,112	0,573	0,102	0,256	0,167	0,025	0,025	0,025

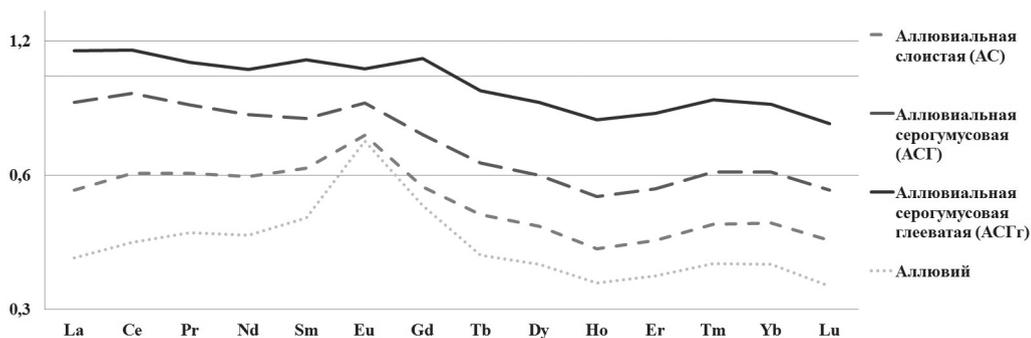


Рис. 2. Отношение содержания РЗЭ в аллювиальных почвах к их содержанию в ВКК

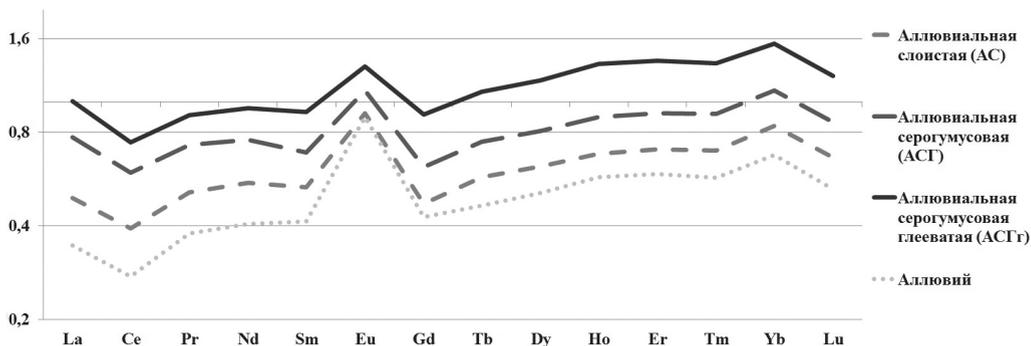


Рис. 3. Отношение содержания РЗЭ в аллювиальных почвах к их среднему содержанию в почвах Китая

почв Китая связан с его близостью к региону р. Амур, где проводились исследования.

В графиках также отображены данные, характеризующие содержание лантаноидов в аллювии, принесенном паводком и перекрывающем аллювиальную серогумусовую почву (рис. 4 и 5). Содержание РЗЭ в аллювии было определено, чтобы выявить возможные аномалии, связанные с природными процессами или антропогенным влиянием на элементный состав речных осадков. Также этот аллювий можно использовать для оценки влияния процессов почвообразования на содержание и распределение РЗЭ в аллювиальных почвах. Исследуемые аллювиальные почвы молоды, и аллювий, на котором они сформировались, не должен сильно отличаться по химическому составу от аллювия, отложенного паводком. Выявленные различия будут отражать региональные особенности трансформации элементного состава аллювиальных почв в ходе педогенеза.

Результаты оценки обеспеченности почв РЗЭ могут сильно варьировать в зависимости от выбранного эталона. Нормирование к ВКК показало, что в песчаных/супесчаных АС- и АСГ-почвах, расположенных возле русла, содержание всех РЗЭ ниже, чем в ВКК (см. рис. 2). В супесчаной легкосуглинистой АСГ-почве (уча-

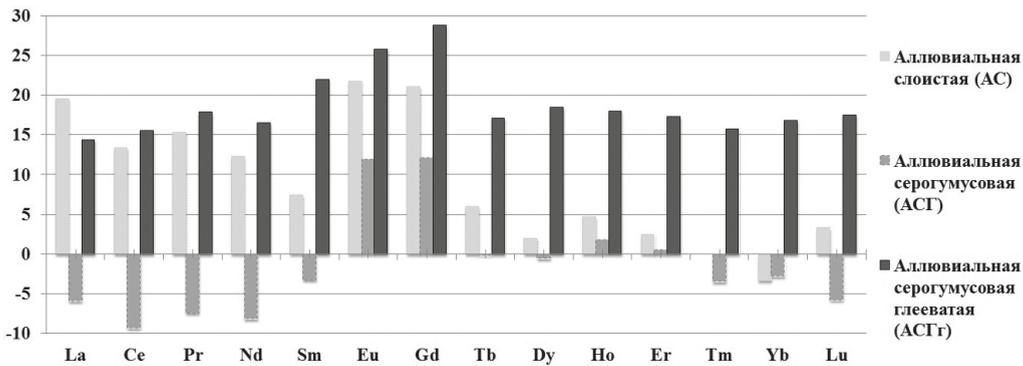


Рис. 4. Изменение валового содержания РЗЭ после паводка, %

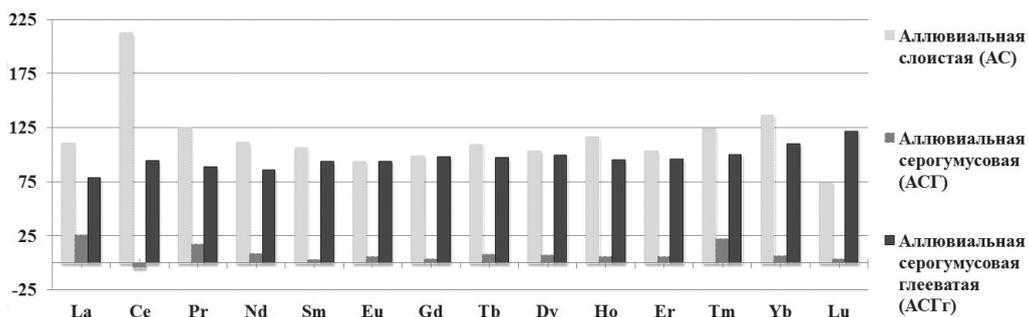


Рис. 5. Изменение содержания подвижной формы РЗЭ после паводка, %

сток, где отобран ее образец, расположен на расстоянии 500 м от русла) содержание легких РЗЭ, к которым относятся La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu (Vodyanitskii, 2012) выше, чем в ВКК. Содержание тяжелых РЗЭ (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) почти сопоставимо с их содержанием в ВКК. В аллювии реки и легких почвах выделяется положительная европиевая аномалия —  $Eu_{ан} = 1,4$ , рассчитанная по формуле (Mihajlovic, et al., 2014)

$$Eu_{ан} = Eu_n : (Sm_n \cdot Gd_n)^{0,5}.$$

Она обусловлена большим содержанием полевых шпатов, часто обогащенных европием (Vodyanitskii, 2012) в донных отложениях р. Амур (Chizhikova, et al., 2011), и при утяжелении гранулометрического состава почв сглаживается до  $Eu_{ан} = 0,9$ . Исчезновение аномалии обусловлено разницей в минералогическом составе аллювиальных почв. В легких почвах содержится больше полевых шпатов в виде первичных минералов.

При нормировании к почвам Китая получают противоположные результаты (см. рис. 3). Тяжелые РЗЭ накапливаются в почве более интенсивно, чем легкие. Европиевая аномалия полностью не сглаживается, хоть и уменьшается от  $Eu_{ан} = 1,9$  до  $Eu_{ан} = 1,4$  при утяжелении гранулометрического состава. Также проявляются

положительная иттриевая аномалия ( $Yb_{ан} = 1,2$ ) и отрицательная аномалия церия ( $Ce_{ан} = 0,7$ ), рассчитанные соответственно по формулам (Mihajlovic et al., 2014):

$$Yb_{ан} = Yb_H : (Tm_H \cdot Lu_H)^{0,5}, \quad Ce_{ан} = Ce_H : (La_H \cdot Pr_H)^{0,5}.$$

Таким образом, усредненные результаты показывают, что для аллювиальных почв р. Амур характерно увеличение содержания РЗЭ при утяжелении гранулометрического состава. Также для них характерна европиевая аномалия, более интенсивно проявляющаяся в легких почвах.

На содержание валовых РЗЭ в разных типах почв паводок повлиял неоднозначно (рис. 4). В АСГ-почве их содержание возросло, в АС-почве наблюдается незначительное снижение некоторых тяжелых лантаноидов, в АСГ-почве большинство легких и тяжелых РЗЭ вымываются. Необычный характер аккумуляции лантаноидов в АС-почве (тогда как в АСГ-почве наблюдается их вымывание при почти идентичных почвенных свойствах) можно объяснить расположением участков этих почв на рельефе:

- СГ-почва сформировалась на вершине берегового вала, который во время паводка был расположен в области водного потока высокой динамики, что обусловило ее интенсивное промывание паводковыми водами и, как следствие, вымывание илистых частиц, сорбирующих на себе РЗЭ;
- АС-почва залегает у подножья берегового вала, куда за счет турбулентности водного потока смещались продукты разрушения берегового вала и участков почв, расположенных выше по течению;
- участок с АСГ-почва расположен на удалении от русла в пойменном понижении, что привело к длительному стоянию паводковых вод и осаждению из них аллохтонного материала.

Полученные данные согласуются с существующим мнением, что при удалении от русла реки динамика водного потока ослабевает, его разрушительная сила снижается и на дно отлагается более мелкое, обогащенное минеральными и органическими соединениями аллохтонное вещество (Gerrard, 1987).

В среднем по почвам максимальное увеличение содержания РЗЭ отмечается для Eu и Gd и составляет около 20 %. Минимальное увеличение отмечается у Yb и Tm — не более 4 %, что связано с их частичным вымыванием из песчаных горизонтов. Тяжелые лантаноиды из-за разницы в ионных радиусах лучше формируют подвижные комплексы с органическими и минеральными компонентами и более подвержены вымыванию, чем легкие (Braun, et al., 1990).

Содержание подвижной формы РЗЭ после паводка в аллювиальных почвах возросло в среднем на 70 % (рис. 5). Вместе с тем в АСГ-почве увеличение этого показателя незначительно. Подвижные фракции микроэлементов очень динамичны, и их содержание может изменяться за короткий промежуток времени. Поэтому рассматривать непосредственное влияние паводка на них не представляется возможным. Но они реагируют на изменение свойств почв. Участки АС- и АСГ-почв, в отличие от участков АСГ-почвы, находятся в понижении пойменного рельефа и более длительный период были затоплены. Это привело к развитию восстановительных условий и более сильному подкислению почв. Низкие значения Eh и pH, в свою очередь, усиливают мобильность РЗЭ (Ran and Liu, 1994; Cao, et al., 2001).

Помимо непосредственного влияния на состав РЗЭ путем вымывания соединений, их содержащих, из аллювиальных почв или внесения их с аллохтонным веществом, паводковые воды изменяют почвенные свойства, что также влияет на характер миграции РЗЭ. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о влиянии на содержание РЗЭ в почвах реакции среды почвенного раствора, частиц глинистых и илистых фракций, органического вещества, емкости катионного обмена, оксидов и гидроксидов железа, марганца и фосфора (Tyler, 2004).

Полученные в ходе наших исследований данные подтверждают высокую значимость глинистых минералов в накоплении РЗЭ (табл. 5). На это указывают высокие коэффициенты корреляции (R) РЗЭ с оксидами алюминия и магния. В аллювиальных почвах, на начальной стадии их развития, эти оксиды преимущественно представлены вторичными алюмосиликатами (Скрябина, 2011). Они в большом количестве содержатся в донных отложениях р. Амур (Chizhikova, et al., 2011) и, следовательно, в аллювиальных почвах.

На значимость гранулометрического состава в содержании и распределении лантаноидов указывают литературные данные (Laveuf and Cornu, 2009; Mihajlovic, et al., 2014). Это связано с высокой адсорбирующей способностью глинистых и, особенно, коллоидных частиц по отношению к РЗЭ. В нашем случае до паводка гранулометрический состав не проявляет достоверных значений R с содержанием РЗЭ (см. табл. 5). Это можно объяснить тем, что почвенные частицы, формирующие гранулометрический состав, представляют собой совокупность глинистых и первичных минералов и органического вещества (Розанов, 2004), но зависимость содержания РЗЭ от доли органического вещества проявляется слабо, что отразилось и на значении R для связи содержания РЗЭ с гранулометрическим составом. Обычно между содержаниями РЗЭ и органического вещества проявляется положительная корреляция, вызванная формированием малоподвижных хелатов. Прочность последних зависит от окислительно-восстановительного потенциала. В окислительных условиях, которые преобладали до паводка, подобные хелаты формируются плохо (Lijun, et al., 1998), и поэтому преобладающая роль в адсорбции РЗЭ принадлежит глинистым минералам. Во время паводка и некоторое время после него преобладали восстановительные условия, всегда и быстро возникающие при затоплении почв (Roppapreguta, 1984). Это привело к усилению хелатообразующей способности органического вещества и возрастанию значения R.

До паводка между рН и содержанием РЗЭ были слабые отрицательные корреляции. После паводка на фоне повышения кислотности почв отрицательные корреляции усилились (см. табл. 5). Также отмечены отрицательные корреляции между содержаниями РЗЭ и оксидом кальция. Таким образом, в исследуемых почвах усиление кислотности почв сопровождается увеличением содержания РЗЭ. Кислотность (рН) почвенного раствора — один из основных факторов, определяющих подвижность РЗЭ. Как правило, она негативно влияет на способность РЗЭ образовывать малоподвижные комплексы с органическим веществом, аморфным железом, марганцем и фосфором, т.е. чем кислее почвы, тем выше подвижность РЗЭ и тем легче они вымываются (Cao, et al., 2001; Zhu, et al., 1993). Вместе с тем при низком содержании лантаноидов кислотность может не оказывать существенного влияния на адсорбцию РЗЭ, которая в большей мере будет зависеть от ионной силы почвенного раствора (Переломов, 2007). Вероятно, что увеличение валового содержания

Таблица 5. Коэффициенты корреляции (метод Пирсона) содержания валовых и подвижных форм РЗЭ, свойств аллювиальных почв и валового макроэлементного состава

Показатель	До паводка		После паводка	
	$\Sigma$ LREE	$\Sigma$ HREE	$\Sigma$ LREE	$\Sigma$ HREE
<i>Валовая форма</i>				
pH <sub>KCl</sub>	-0,17	-0,04	-0,59	-0,64
ЕКО	0,85	0,92	0,74	0,77
C <sub>орг. в-ва</sub>	0,47	0,52	0,57	0,59
Физ. глина	0,69	0,61	0,70	0,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,85	0,81	0,94	0,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36	0,23	0,63	0,55
MnO	0,40	0,47	0,31	0,25
CaO	0,03	0,09	-0,26	-0,28
MgO	0,86	0,93	0,93	0,95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,33	0,32	0,72	0,63
<i>Подвижная форма</i>				
pH <sub>KCl</sub>	-0,77	-0,77	-0,88	-0,87
ЕКО	0,33	0,33	0,61	0,64
C <sub>орг. в-ва</sub>	-0,11	-0,12	0,38	0,41
Физ. глина	0,48	0,45	0,58	0,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93	0,93	0,93	0,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,70	0,69	0,41	0,45
MnO	-0,17	-0,19	-0,02	0,01
CaO	-0,57	-0,59	-0,55	-0,52
MgO	0,57	0,57	0,86	0,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,26	-0,29	0,37	0,41

РЗЭ никак не связано с pH и в большей мере обусловлено их поступлением с аллохтонным веществом и инфильтрацией последнего в глубь почвенного профиля. Усиление отрицательной корреляции между валовым содержанием РЗЭ и pH после паводка связано с увеличением доли подвижных РЗЭ в их валовом составе.

Обменные катионы, как правило, формируют сильную положительную связь с содержанием РЗЭ. Из-за зависимости емкости катионного обмена от гранулометрического состава, а также от содержания органического вещества и глинистых

минералов, формирующих поглотительную способность почв, соотношения РЗЭ с обменными катионами вторичны (Mihajlovic, et al., 2014; Gu, et al., 2001).

Оксиды марганца и железа служат основными носителями лантаноидов в зоне гипергенеза, что подразумевает между ними тесную связь (Водяницкий, 2012). Несмотря на то что в литературных источниках приводятся данные преимущественно о взаимодействии аморфных форм Mn и Fe с РЗЭ, были определены R между РЗЭ и валовым содержанием оксидов Mn и Fe. Полученные результаты несколько противоречат имеющимся литературным данным, так как оксиды Mn и Fe не проявляют достоверных R с РЗЭ (см. табл. 5). Вероятно, это связано с более низкой адсорбционной способностью кристаллических форм Fe и Mn к РЗЭ в сравнении с их аморфными формами (Yan, et al., 1999). Несмотря на слабую выраженность R, они показывают, что до паводка у РЗЭ преобладали манганофильные свойства, а после паводка — сидерофильные. Содержание оксидов марганца после паводка незначительно снизилось. Содержание оксидов железа увеличилось в органических горизонтах и уменьшилось в минеральных, но в среднем изменилось мало (см. табл. 2). Это указывает, что не содержание оксидов имеет значение, а условия, в которых аккумулируются лантаноиды. Адсорбция РЗЭ оксидами Mn и Fe, по литературным данным, определяется реакцией среды и окислительно-восстановительным потенциалом (Cao, et al., 2001). При низких pH и Eh комплексы РЗЭ с железом и марганцем разрушаются. В исследуемых почвах развитие восстановительных условий в результате длительного затопления, вероятно, привели к формированию условий, при которых комплексы РЗЭ с оксидами железа более устойчивы.

Как правило, между фосфором и РЗЭ наблюдается тесная связь, обусловленная низкой растворимостью фосфатов лантаноидов и их аккумуляций в почвах (Tyler, 2004; Zhang, et al., 2006). В исследуемых аллювиальных почвах до паводка значения R для связи между содержаниями РЗЭ и оксидами фосфора низкие, после паводка этот показатель значительно увеличился (см. табл. 5). Соотношения между содержаниями оксидами фосфора и РЗЭ определяются реакцией среды почвенного раствора — в кислых почвах фосфорные комплексы с РЗЭ разрушаются. Следовательно, в кислых аллювиальных почвах изначальные минералы фосфора постепенно разрушились, и связь между ними и РЗЭ ослабла. Во время паводка вместе с аллювиальным материалом в аллювиальные почвы поступили новые фосфорсодержащие минералы, содержащие РЗЭ, что привело к указанному повышению R.

По результатам корреляционного анализа, для подвижных РЗЭ характерен ряд тех же закономерностей, что и для их валовых форм (см. табл. 3). Это отрицательные корреляции между содержанием подвижных РЗЭ, значениями pH и содержанием оксидов кальция, а также положительные корреляции РЗЭ с содержаниями оксидов алюминия и магния, указывающие на адсорбцию РЗЭ глинистыми минералами. Но, в отличие от своей валовой формы, подвижные РЗЭ проявляют более сильные сидерофильные свойства, которые после паводка слабеют, что связано с разрушением комплексов оксидов железа с РЗЭ в восстановительных условиях. Между содержаниями органического вещества и подвижных РЗЭ до паводка были слабые отрицательные корреляции, а после паводка — слабые положительные. Как следствие, корреляции между содержанием подвижных РЗЭ, емкостью катионного обмена и гранулометрическим составом тоже снижены. По значениям R можно сделать вывод, что подвижные РЗЭ преимущественно аккумулируются глинисты-

ми минералами и оксидами железа, но при развитии восстановительных процессов значимость оксидов железа в этой аккумуляции снижается.

## Заключение

Содержание лантаноидов в аллювиальных почвах прирусловой поймы среднего течения р. Амур незначительно, оно ниже, чем в ВКК и почвах Китая. Содержание валовой формы РЗЭ варьирует от 60 мг/кг в песчаных почвах до 160 мг/кг в легкосуглинистых, содержание их подвижных форм в данных почвах — от 1 до 10 мг/кг.

Аккумуляция РЗЭ (и валовой, и подвижной форм) в аллювиальных почвах преимущественно обусловлена содержанием глинистых минералов. На это указывают высокие коэффициенты корреляции между содержаниями РЗЭ и оксидов алюминия и магния. Следующий по значимости фактор удерживания РЗЭ в почвах — органическое вещество. На подвижность РЗЭ сильно влияет реакция среды. РЗЭ проявляют средние по выраженности сидерофильные свойства, но интенсивность последних зависит от рН и окислительно-восстановительного потенциала почв.

В целом паводок привел к увеличению содержания РЗЭ. Содержание их валовой формы увеличилась в среднем на 10 %, подвижной — на 70 %. Интенсивность вымывания и накопления РЗЭ в аллювиальных почвах обусловлена силой водного потока. В свою очередь, влияние поемных вод на эти процессы определяется типом поймы, характером пойменного рельефа, растительным покровом, положением участка с исследуемой почвой относительно русла реки и пойменного рельефа. В области повышенной динамики паводковых вод наблюдается преимущественно вымывание элементов, а в области стоячих вод — их накопление.

Также после паводка усилились корреляции между содержаниями РЗЭ, органического вещества и оксидов фосфора. В первом случае это связано с формированием устойчивых органических хелатов в восстановительной обстановке, возникшей при затоплении почв, во втором — с внесением аллохтонного вещества содержащего минералы фосфатов.

## Литература

- Аринушкина, Е. В., 1970. Руководство по химическому анализу почв. Изд-во МГУ, Москва.
- Брянин, С. В., Сорокина, О. А., 2015. Вертикальное распределение редкоземельных элементов в почвах южной тайги верхнего Приамурья, сформированных на горных породах различного состава. Тихоокеанская геология 3 (34), 104–111.
- Водяницкий, Ю. Н., 2012. Лантаниды почвы и их влияние на растения. Агрохимия 4, 84–96.
- Кожевникова, Н. М., 2010. Особенности распределения валового и подвижных форм церия, неодима, самария в профиле серой лесной почвы Забайкалья. Агрохимия 6, 65–68.
- Кожевникова, Н. М., Ермаков, Е. П., 2010. Распределение церия, неодима и самария в каштановой почве Забайкалья. Вестник СВНЦ ДВО РАН 3, 95–98.
- Мартынов, А. В., 2016. Изменение свойств аллювиальных почв после крупного паводка на примере среднего течения р. Амур. Современные проблемы науки и образования 3, 405.
- Новицкий, М. В., Донских, И. Н., Чернов, Д. В., 2009. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Проспект Науки, Санкт-Петербург.
- Переломов, Л. В., 2007. Взаимодействие редкоземельных элементов с биотическими и абиотическими свойствами почв. Агрохимия 11, 85–96.
- Перельман, А. И., Касимов, Н. С., 2000. Геохимия ландшафта. Изд-во МГУ, Москва.

- Розанов, Б. Г., 2004. Морфология почв. Академический проект, Москва.
- Скрябина, О. А., 2011. Минералогический состав почв и почвообразующих пород. Изд. Перм. гос. сельскохозяйств. акад., Пермь.
- Сорокина, О. А., Гусев, М. Н., 2014. Содержание редкоземельных элементов в пойменных почвах долины р. Зея (бассейн р. Амур). Вестник СВНЦ ДВО РАН 3, 36–40.
- Шишов, Л. Л., Тонконогих, В. Д., Лебедева, И. И., Герасимова, М. И., 2004. Классификация и диагностика почв России. Ойкумена, Смоленск.
- Шраг, В. И. 1969. Пойменные почвы их мелиорация и сельскохозяйственное использование. Рос. сельхозиздат, Москва.
- Braun, J.-J., Pagel, M., Muller, J.-P., Bilong, P., Michard, A., Guillet, B., 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (3), 781–795. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90373-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90373-S)
- Cao, X., Chen, Y., Wang, X., Deng, X., 2001. Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere* 44 (4), 655–661. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00492-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00492-6)
- Chizhikova, N. P., Sirotskii, S. E., Kharitonova, G. V., Utkina, E. V., Manucharov, A. S., Konovalova, N. S., 2011. Mineralogy and chemistry of finely dispersed bottom sediments in the Amur River. *Eurasian Soil Science* 7 (44), 781–793. <https://doi.org/10.1134/S106422931>
- Du Laing, G., Meers, E., Dewispelaere, M., Vandecasteele, B., Rinklebe, J., Tack, F. M. G., Verloo, M. G., 2009. Heavy metal mobility in intertidal sediments of the Scheldt estuary: field monitoring. *Science of the Total Environment* 407, 2919–2930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.024>
- Förstner, U., Susanne Heise, S., Schwartz, R., Westrich, B., Ahlf, W., 2004. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe river catchment area. *Soils and Sediments* 4 (4), 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
- Gerrard, J., 1987. Alluvial Soils, Hutchinson Ross, New York.
- Gu, X., Wang, X., Gu, Z., Dai, L., Chen, Y., 2001. Effects of humic acid on speciation and bioavailability to wheat of rare earth elements in soil. *Chemical Speciation and Bioavailability* 13 (3), 83–88. <https://doi.org/10.3184/095422901782775426>
- Hu, Z., Haneklaus, S., Sparovek, G., Schnug, E., 2006. Rare earth elements in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 1381–1420. <https://doi.org/10.1080/00103620600628680>
- Kabata-Pendias, A., 2011. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton.
- Laveuf, C., Cornu, S., 2009. A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma* 154 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.002>
- Lijun, W., Shen, Z., Xiaojiang, G., Shujuan, L., Yuqi, W., Jingxin, S., Aitang, H., Hongmin, C., Fanqing, G., 1998. Geochemical characteristics of rare earth elements in different types of soils in China. *Journal of Rare Earths* 16 (1), 51–58.
- Mihajlovic, J., Hans-Joachim, S., Rinklebe, J., 2014. Geochemical fractions of rare earth elements in two floodplain soil profiles at the Wupper River, Germany. *Geoderma* 228–229, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.009>
- Mineral commodity summaries 2011, 2011. U.S. Geological Survey, Washington.
- Ponnamperuma, F. N., 1984. Effects of Flooding on Soils / Kozlowski, T. T. (Ed.). Flooding and plant growth. Academic Press, London, 9–46.
- Ran, Y., Liu, Z., 1994. Concentration and distribution of REEs in mainly soils of China. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 12, 248–256. <https://doi.org/10.1080/00103620600628680>
- Rinklebe, J., Franke, C., Neue, H.-U., 2007. Aggregation of floodplain soils based on classification principles to predict concentrations of nutrients and pollutants. *Geoderma* 14, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.001>
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2004. Composition of the continental crust / Holland, H. D., Turekian, K. K. (Eds.) Treatise on geochemistry 3. Elsevier, Amsterdam.
- Sorokina, O. A., Zarubina, N. V., 2013. The content of chemical elements in alluvial soils and bottom sediments of the Urkan River (the Amur River basin). *Eurasian Soil Science* 6 (46), 644–653. <https://doi.org/10.1134/S1064229313060094>
- Tyler, T., 2004. Rare earth elements in soil and plant systems — A review. *Plant and Soil* 267 (1), 191–206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>
- Verbitskaya, E. M., Ageeva, S. V., Dugina, I. O., Dunaeva, I. M., Efremova, N. F., Romanskii, S. O., Tarasyuk, V. V., 2015. Catastrophic flood on the Amur River in summer 2013: Features and causes. *Russian Meteorology and Hydrology* 10 (40), 683–690. <https://doi.org/10.3103/S1068373915100064>

- Vodyanitskii, Y.N., 2012. Geochemical fractionation of lanthanides in soils and rocks: a review of publications. *Eurasian Soil Science* 1 (45), 56–67. <https://doi.org/10.1134/S1064229312010164>
- Yan, X.P., Kerrich, R., Hendry, M.J., 1999. Sequential leachates of multiple grain size fractions from a clay-rich till, Saskatchewan, Canada: implications for controls on the rare earth element geochemistry of porewaters in an aquitard. *Chemical Geology* 158 (1–2), 53–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00011-X)
- Zhang, Y., Deng, L.B., Ye, W.H., 2006. Does the long-term application of calcium superphosphate lead to an increase of the soil rare earth element contents? *Journal of Environmental Sciences* 18 (1), 130–134.
- Zhu, J.G., Xing, G.X., Yamasaki, S., Tsumura, A., 1993. Adsorption and desorption of exogenous rare earth elements in soils: I. rate and forms of rare earth elements sorbed. *Pedosphere* 3 (4), 299–308.

Статья поступила в редакцию 31 января 2018 г.

Статья рекомендована в печать 9 апреля 2018 г.

Контактная информация:

Мартынов Александр Викторович — [lexx\\_1981@list.ru](mailto:lexx_1981@list.ru)

## The effect of the 2013 flood on the rare earth elements content in alluvial soils of the Amur River floodplain

*Alexander V. Martynov*

Institute of Geology and Nature Management RAS,  
1, per. Relochny, Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation

**For citation:** Martynov A. V. The effect of the 2013 flood on the rare earth elements content in alluvial soils of the Amur River floodplain. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 2, pp. 160–177. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.203>

Disastrous flood effect on the content of the total and mobile form of rare earth elements has been studied in the alluvial soil in the middle reach of Amur River. Relationships between rare earth and major element concentrations and soil properties before and after the flood have been revealed. Elements concentration was measured by using ICP–MS. Correlation test used for revealing the interactions between soil properties and REE concentrations. Contents of REE in soils increasing with the distance from the riverbed and heaving of granulometric soil composition. Total contents of REE prior the flood varied from 70 to 170 mg/kg<sup>-1</sup> while mobile forms of REE varied from 1 to 11 mg/kg<sup>-1</sup>. Flood results in REE accumulation in the alluvial soils, accumulation mainly occurred on the surfaces of clay minerals and mobility of REE is affected by soil pH. Flood increase adsorption of REE by organic matter and phosphates. In average total REE contents increased by 10 %, mobile forms — by 70 %. Correlation coefficients with organic matter and phosphorus oxides after flooding are improved.

*Keywords:* alluvial soils, rare earth elements, mass spectroscopy, flood, Amur River, correlation analysis.

## References

- Arinushkina, E. V., 1970. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Guidelines for the chemical analysis of soils]*. University of Moscow, Moscow. (In Russian)
- Braun, J.-J., Pagel, M., Muller, J.-P., Bilong, P., Michard, A., Guillet, B., 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (3), 781–795. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90373-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90373-S)
- Bryanin, S.V., Sorokina, O. A., 2015. Vertikal'noe raspredelenie redkozemel'nykh elementov v pochvakh iuzhnoi taigi verkhnego Priamur'ia, sformirovannykh na gornykh porodakh razlichnogo sostava

- [Vertical distribution of rare earth elements in southern taiga soils of Upper Priamurye formed on the mountain rocks of various compositions]. *Tikhookeanskaia geologiya* [Pacific Geology] 3 (34), 104–111. (In Russian)
- Cao, X., Chen, Y., Wang, X., Deng, X., 2001. Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere* 44 (4), 655–661. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00492-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00492-6)
- Chizhikova, N. P., Sirotskii, S. E., Kharitonova, G. V., Utkina, E. V., Manucharov, A. S., Konovalova, N. S., 2011. Mineralogy and chemistry of finely dispersed bottom sediments in the Amur River. *Eurasian Soil Science* 7 (44), 781–793. <https://doi.org/10.1134/S106422931>
- Du Laing, G., Meers, E., Dewispelaere, M., Vandecasteele, B., Rinklebe, J., Tack, F. M. G., Verloo, M. G., 2009. Heavy metal mobility in intertidal sediments of the Scheldt estuary: field monitoring. *Science of the Total Environment* 407, 2919–2930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.024>
- Forstner, U., Susanne Heise, S., Schwartz, R., Westrich, B., Ahlf, W., 2004. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe river catchment area. *Soils and Sediments* 4 (4), 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
- Gerrard, J. 1987. *Alluvial Soils*, Hutchinson Ross, New York.
- Gu, X., Wang, X., Gu, Z., Dai, L., Chen, Y., 2001. Effects of humic acid on speciation and bioavailability to wheat of rare earth elements in soil. *Chemical Speciation and Bioavailability* 13 (3), 83–88. <https://doi.org/10.3184/095422901782775426>
- Hu, Z., Haneklaus, S., Sparovek, G., Schnug, E., 2006. Rare earth elements in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 1381–1420. <https://doi.org/10.1080/00103620600628680>
- Kabata-Pendias, A., 2011. *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton.
- Kozhevnikova, N. M., 2010. Osobennosti raspredeleniia valovogo i podvizhnykh form tseriia, neodima, samarii v profile seroi lesnoi pochvy Zabaikal'ia [Distribution of Cerium, Neodymium, and Samarium in Gray Forest Soil of the Transbaikalia]. *Agrokhimia* [Agrochemistry] 6, 65–68. (In Russian)
- Kozhevnikova, N. M., Ermakov, E. P., 2010. Raspredelenie tseriia, neodima i samarii v kashtanovoi pochve Zabaikal'ia [Distributions of cerium, neodium and samarium in chestnut soils over Baikal Lake areas]. *Vestnik of the North-Eastern scientific center FEB RAS* 3, 95–98. (In Russian)
- Laveuf, C., Cornu, S., 2009. A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma* 154 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.002>
- Lijun, W., Shen, Z., Xiaojiang, G., Shujuan, L., Yuqi, W., Jingxin, S., Aitang, H., Hongmin, C., Fanqing, G., 1998. Geochemical characteristics of rare earth elements in different types of soils in China. *Journal of Rare Earths* 16 (1), 51–58.
- Martynov, A. V., 2016. *Izmenenie svoistv alluvial'nykh pochv posle krupnogo povodka na primere srednego techeniia r. Amur* [Changing the properties of alluvial soils after intense flood on the example of the middle reaches of the Amur River]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education] 3, 405. (In Russian)
- Mineral commodity summaries 2011, 2011. U. S. Geological Survey, Washington.
- Mihajlovic, J., Hans-Joachim, S., Rinklebe, J., 2014. Geochemical fractions of rare earth elements in two floodplain soil profiles at the Wupper River, Germany. *Geoderma* 228–229, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.009>
- Novitsky, M. V., Donskikh, I. N., Chernov, D. V., 2009. *Laboratno-prakticheskie zaniatia po pochvovedeniiu* [Laboratory and practical classes on soil science]. *Prospekt Nauki*, St. Petersburg. (In Russian)
- Perelman, A. I., Kasimov, N. S., 2000. *Geokhimiia landshafta* [Geochemistry of the landscape], Moscow State University, Moscow. (In Russian)
- Perelomov, L. V., 2007. *Vzaimodeistvie redkozemel'nykh elementov s bioticheskimi i abioticheskimi svoistvami pochv* [Interaction of rare earth elements with biotic and abiotic properties soil]. *Agrokhimia* [Agrochemistry] 11, 85–96. (In Russian)
- Ponnamperuma, F. N., 1984. *Effects of Flooding on Soils* / Kozlowski, T. T. (Ed.). *Flooding and plant growth*. Academic Press, London, 9–46.
- Ran, Y., Liu, Z., 1994. Concentration and distribution of REEs in mainly soils of China. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 12, 248–256. <https://doi.org/10.1080/00103620600628680>
- Rinklebe, J., Franke, C., Neue, H.-U., 2007. Aggregation of floodplain soils based on classification principles to predict concentrations of nutrients and pollutants. *Geoderma* 141, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.001>
- Rozanov, B. G., 2004. *Morfologiya pochv* [Morphology of soils]. *Akademicheskii proekt*, Moscow. (In Russian)

- Rudnick, R. L., Gao, S., 2004. Composition of the continental crust / Holland, H. D., Turekian, K. K. (Eds.) Treatise on geochemistry 3. Elsevier, Amsterdam.
- Scriabina, O. A., 2011. Mineralogicheskii sostav pochv i pochvoobrazuiushchikh porod [Mineralogical composition of soils and soil-forming rocks]. Izd. Permskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii, Perm. (In Russian)
- Shishov, L. L., Tonkonogikh, V. D., Lebedeva, I. I., Gerasimov, M. I., 2004. Klassifikatsiia i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Oikumena, Smolensk. (In Russian)
- Shrag, V. I., 1969. Poimennye pochvy ikh melioratsiia i sel'skokhoziaistvennoe ispol'zovanie [Floodplain soils for their amelioration and agricultural use]. Rossel'khozizdat, Moscow. (In Russian)
- Sorokina, O. A., Gusev, M. N., 2014. Soderzhanie redkozemel'nykh elementov v poimennykh pochvakh doliny r. Zeia (bassein r. Amur) [Content of rare earth elements in the floodplain soils of the Zeya River valley (the Amur River basin)]. Vestnik of the North-Eastern scientific center FEB RAS 3, 36–40. <https://doi.org/10.1134/S1064229313060094> (In Russian)
- Sorokina, O. A., Zarubina, N. V., 2013. The content of chemical elements in alluvial soils and bottom sediments of the Urkan River (the Amur River basin). Eurasian Soil Science 6 (46), 644–653. (In Russian)
- Tyler, G., 2004. Rare earth elements in soil and plant systems — A review. Plant and Soil 267 (1), 191–206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>
- Verbitskaya, E. M., Ageeva, S. V., Dugina, I. O., Dunaeva, I. M., Efremova, N. F., Romanskii, S. O., Tarasyuk, V. V., 2015. Catastrophic flood on the Amur River in summer 2013: Features and causes. Russian Meteorology and Hydrology 10 (40), 683–690. <https://doi.org/10.3103/S1068373915100064>.
- Vodyanitskii, Y. N., 2012. Geochemical fractionation of lanthanides in soils and rocks: a review of publications. Eurasian Soil Science 1 (45), 56–67. <https://doi.org/10.1134/S1064229312010164>
- Vodyanitskii, Y. N., 2012. Lantanidy pochvy i ikh vliianie na rasteniia [Lanthanides in the Soil and their Effect on Plants]. Agrokhimiiia [Agrochemistry] 4, 84–96. (In Russian)
- Yan, X. P., Kerrich, R., Hendry, M. J., 1999. Sequential leachates of multiple grain size fractions from a clay-rich till, Saskatchewan, Canada: implications for controls on the rare earth element geochemistry of porewaters in an aquitard. Chemical Geology 158 (1–2), 53–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00011-X)
- Zhang, Y., Deng, L. B., Ye, W. H., 2006. Does the long-term application of calcium superphosphate lead to an increase of the soil rare earth element contents? Journal of Environmental Sciences 18 (1), 130–134.
- Zhu, J. G., Xing, G. X., Yamasaki, S., Tsumura, A., 1993. Adsorption and desorption of exogenous rare earth elements in soils: I. rate and forms of rare earth elements sorbed. Pedosphere 3 (4), 299–308.

Author's information:

*Alexander V. Martynov* — [lexx\\_1981@list.ru](mailto:lexx_1981@list.ru)