

## ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ В ДЕЛЬТАХ СЕВЕРНЫХ РЕК

Е.М. Коробова, Н.Г. Украинцева\*, В.В. Сурков\*\*, Е.А. Домбровская\*

*Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН,  
119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия, korobova@geokhi.ru*

*\* Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, ukraintseva@mail.ru*

*\*\* Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, vsurkov@yandex.ru*

Проведены исследования техногенного загрязнения геосистем в дельтах рек Енисей и Печоры от глобальных и региональных источников. Уровень загрязнения радионуклидами и тяжелыми металлами растений, почв и природных вод оценен методом ландшафтно-геохимического профилирования островного и берегового секторов дельт на разном удалении от морской акватории. Для р. Енисей подтверждено локальное загрязнение пойм за счет речного переноса радиоизотопа цезия от Красноярского горно-химического комбината. Наибольшая аккумуляция радиоцезия обнаружена на островах, особенно во фронтальной части дельты, которая играет роль своеобразного барьера на пути миграции веществ-загрязнителей с речным стоком. На террасах и междуречьях низовьев Енисея выявлена тенденция роста концентраций меди и никеля во мхах и листьях ивы по мере приближения к Норильскому комбинату. Для низовьев р. Печоры установлено атмосферное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  на глобальном уровне. В трех километрах ниже г. Нарьян-Мар в водах Печоры обнаружено повышенное содержание меди и цинка. Выявленные закономерности можно использовать для целенаправленного обнаружения следов загрязнения.

### ВВЕДЕНИЕ

Дельты крупных северных рек – Енисей и Печоры – представляют особый интерес, поскольку эти реки поставляют терригенный материал непосредственно в Арктический бассейн. Основной целью исследований было выявление техногенного загрязнения наземных экосистем в дельтах Енисей и Печоры на разном удалении от источников глобального и регионального происхождения и закономерностей его перераспределения в сопряженных ландшафтах.

Региональными источниками загрязнения низовьев р. Енисей являются концентратор «Норильский никель», зона атмосферного влияния которого простирается более чем на 150 км [Ермаков, Украинцева, 2005], и Красноярский горно-химический комбинат (ГХК), деятельность которого привела к загрязнению поймы Енисея практически на всем ее протяжении ниже ГХК [Кузнецов и др., 2000; Сухоруков и др., 2004; Vukulovsky et al., 1995]. Бассейн Печоры принадлежит к немногим регионам с практически ненарушенным комплексом экосистем и рассматривается в качестве эталона для изучения естественных природных процессов в дельтах крупных северных рек [Резолюция..., 2000]. Вместе с тем его территория была затронута атмосферными выпадениями радионуклидов при испытаниях ядерного оружия и после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Согласно данным М.Г. Нифонтовой [2000] и Атласу радиоактивного загрязнения [1998], на некоторых

участках в низовьях р. Печоры плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  возросла после аварии на ЧАЭС в два раза (по состоянию на 1995 г.).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафтно-геохимические профили, пересекающие разные уровни поймы, древние террасы Енисей и Печоры и периферийные части водоразделов, были расположены на разном удалении от морской акватории. Тестовые участки для отбора образцов были заложены в геохимически контрастных условиях с предположительно максимальной речной и атмосферной аккумуляцией радионуклидов. Почвенные профили опробовались с шагом 2, 5 и 10 см до глубины мерзлых пород или грунтовых вод (30–120 см). Среди растений отбирались доминанты, имеющие важное пищевое и индикационное значение (мхи, лишайники, злаки и осоки, хвощ, ива и ольха). Воздушно-сухие измельченные пробы (воздушно-сухая масса – в.с.м.) анализировались на содержание радионуклидов на гамма-спектрометре Canberra (США) (аналитики – Борисов А.П., ГЕОХИ РАН, Киров С.С., НПО «Радон»). Ошибка определения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах не превышала 5–10 %, в растениях варьировала от 3 до 35 %. Содержание тяжелых металлов в образцах почв и растений определено с помощью рентгенофлуоресцентного метода на спектрометрах ORTEC-TEFA и

СПАРК-1 (аналитики – Сорокин С.Е., Почвенный институт РАСХ, Сизов Е.М., ГЕОХИ РАН). Анализ вод и водных вытяжек проведен в Почвенном институте им. В.В. Докучаева химически (аналитик – Гришина Р.В.) и Рязанском госуниверситете им. С.А. Есенина методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС, аналитик – Тобратов С.А.). Выделение частиц микро- и наноразмерностей из грунтовых вод выполнено Т.В. Даниловой на мембранных фильтрах по методике, разработанной в ГЕОХИ РАН [Шкинев, 2009]. Определение микроэлементов в этих фракциях проведено В.К. Карандашевым.

### СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ <sup>137</sup>Cs

Содержание радиоцезия в почвах и растениях в среднем не превышает значений глобального фона. Однако в зависимости от характера загрязнения, геоморфологического положения тестового участка, типа почвы и речных отложений, вида растения содержание радиоцезия может существенно изменяться (см. таблицу).

В низовьях р. Енисей максимальные величины плотности загрязнения <sup>137</sup>Cs (до 88 кБк/м<sup>2</sup>) обнаружены во фронтальной части дельты у пос. Усть-Порт, на низкой пойме о. Пашкова. Это связано с региональным загрязнением речного стока сбросами Красноярского ГХК. В средней части дельты р. Енисей (пойма о. Тысяра) загрязнение <sup>137</sup>Cs заметно меньше (20 и 25 кБк/м<sup>2</sup>), но также превышает глобальный уровень (2,0–2,9 кБк/м<sup>2</sup>). По нашим оценкам, этот участок принимает до 30 % суммарного стока реки. Плотность загрязнения высоких пойм и террас (0,4–2,8 кБк/м<sup>2</sup>) близка по уровню глобальным выпадениям. В трансаккумулятивных депрессиях отмечено относительное накопление радиоцезия (до двукратного по отноше-

нию к фону), обусловленное, по-видимому, аккумуляцией <sup>137</sup>Cs с поверхностным стоком.

В низовьях р. Печоры максимальной удельной активностью (до 150–215 Бк/кг) и плотностью загрязнения характеризовались тундровые почвы водораздельных ландшафтов и террас разного высотного уровня (от 7,6 до 30 м над межленным уровнем реки) (см. таблицу). Загрязнение южных террас (пос. Бол. Сопка) ниже, чем северных приморских (м. Болванский, пос. Юшино). Возможно, это объясняется близостью последних к районам проведения ядерных испытаний. В отличие от низовьев Енисея удельная активность радиоцезия в почвах пойм (2,5–25 Бк/кг) на порядок ниже, чем на террасах. Это подтверждает отсутствие существенных региональных источников радиационного загрязнения стока Печоры. Вместе с тем суммарная плотность загрязнения пойменных почв (особенно на островах – 2–6 кБк/м<sup>2</sup>) оказалась сопоставимой и локально более высокой, чем на террасах (1,0–2,4 кБк/м<sup>2</sup>). Это свидетельствует об аккумуляции загрязнителей в поймах рек.

В почвенных разрезах выявились три основных типа распределения радиоцезия: 1) с максимальным содержанием и запасом радионуклида в верхних горизонтах почв; 2) с захоронением верхнего наиболее загрязненного органогенного горизонта в результате солифлюкционных и оползневых процессов; 3) с многократным захоронением загрязненных горизонтов в ходе ежегодных циклов затопления и аллювиальной седиментации. Первый тип характерен для водораздельных и террасовых почв, второй тип – для склоновых, а третий – для пойменных. В торфяно-глеевых и особенно торфяных почвах террас выявлено относительное увеличение концентрации <sup>137</sup>Cs у подошвы сезонноталого слоя, что, по нашему мнению, явля-

Содержание радиоцезия в компонентах элементарных ландшафтов (воздушно-сухая масса – в.с.м., на год обследования)

Местоположение ландшафтных профилей	Кол-во тестовых участков	<sup>137</sup> Cs, Бк/кг			
		В почвах	В растениях		
			Мхи	Ивы (листья)	Хвои
Дельта р. Енисей, пос. Усть-Порт					
Геосистемы высоких террас	6	1,3–282	10–137	26–108	12–53
Правобережные пойменные геосистемы	5	0,2–117	30; 49	21–81	9–15
Островные пойменные геосистемы	7	0,8–325	10	17–61	19–44
Печорский залив, м. Болванский					
Геосистемы высоких террас	3	16–156	62; 118	67; 142	54–119
Дельта р. Печоры (пос. Юшино, Бол. Сопка, Искатели)					
Геосистемы высоких террас	5	30–215	31–125	н/о	–
Береговые пойменные геосистемы	1	10	–	56	–
Островные пойменные геосистемы	5	2,5–20	–	24–51	7–109

Примечание. Прочерк – пробы не отбирались, н/о – не определяли.

ется следствием многолетнего вымораживания и концентрирования почвенных растворов в зоне контакта с мерзлым грунтом.

Общей закономерностью накопления радиоцезия доминирующими группами растений является рост его содержания в ряду: злаки < ольха, ива (листья) ≤ лишайники ≤ хвощи < мхи (зеленая часть) < мхи (нижняя, бурая часть). Растения тундры отличаются повышенным коэффициентом перехода (КП) радиоцезия из почвы, сопоставимым с КП из гидроморфных почв в зоне чернобыльского загрязнения. Виды, более активно накапливающие калий, как правило, имеют более низкое значение КП радиоцезия [Korobova, 2009].

### СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (МЕДЬ, НИКЕЛЬ, ЦИНК)

В низовьях Енисея существенного загрязнения тестовых участков тяжелыми металлами не

обнаружено. Уровни и характер накопления элементов зависят от удаленности регионального источника. Так, для террас и междуречий выявлен рост концентраций никеля во мхах (в 3–5 раз) и листьях ивы (в 2–3 раза) по мере приближения к Норильскому комбинату (рис. 1). Та же тенденция характерна и для меди. Очевидно, что причиной этого являются атмосферный перенос и последующее выпадение поллютантов, а также их вторичное перераспределение с речным и поверхностным стоком. Последнее находит отражение в относительном накоплении загрязнителей в тонкодисперсных аллювиальных горизонтах и захоронении загрязненных горизонтов пойменных почв. Повышение содержания Cu, Ni, Zn в верхних и надмерзлотных горизонтах почв высоких террас в верхней дельте Енисея (рис. 2) может быть связано как с локальным поверхностным загрязнением, так и с естественным био- и криогенным концент-

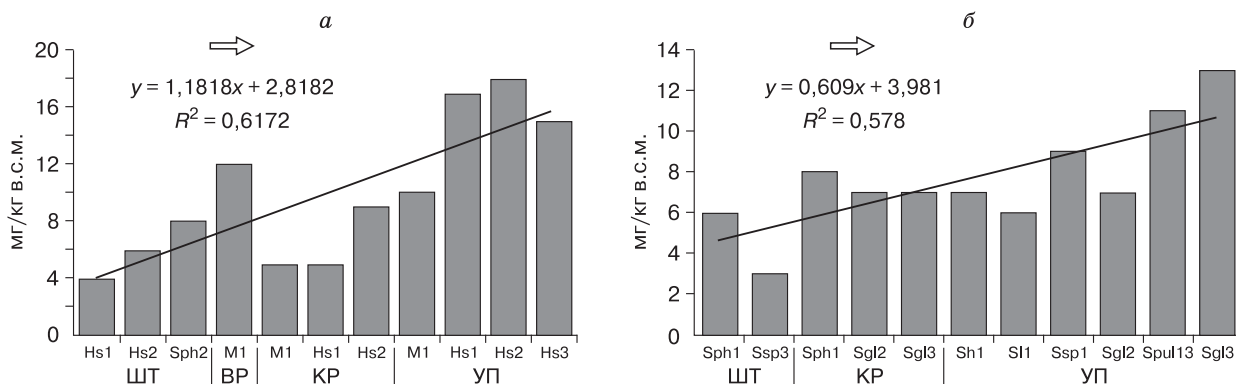


Рис. 1. Никель в моховом покрове (а) и листьях ивы (б) террасовых геосистем дельты р. Енисей.

Стрелкой показано направление к Норильскому комбинату. Индексы участков: ШТ – м. Шайтанский; ВР – пос. Воронцово; КР – пос. Караул; УП – пос. Усть-Порт. Элементарные геосистемы: 1 – элювиальные; 2 – транзитные; 3 – аккумулятивные. Виды растений: Hs – *Hylocomium splendens*; Sph – *Sphagnum*; М – средняя проба мхов; Sgl – *Salix glauca* L.; Sh – *Salix hastata* L.; Sl – *Salix lanata* L.; Spul – *Salix pulchra* Cham.; Sph – *Salix phylicifolia* L.; Ssp – *Salix* sp.

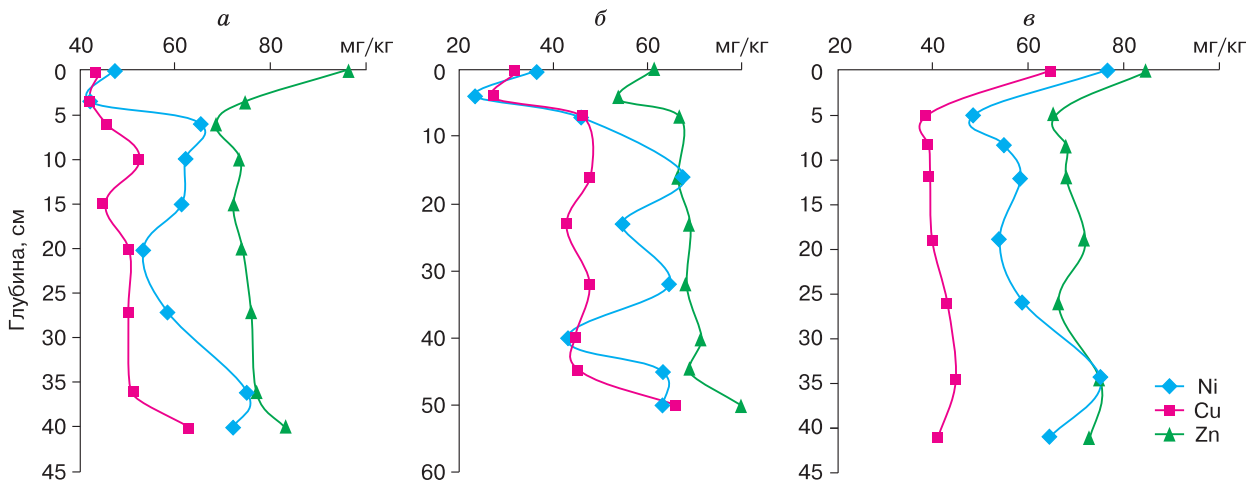
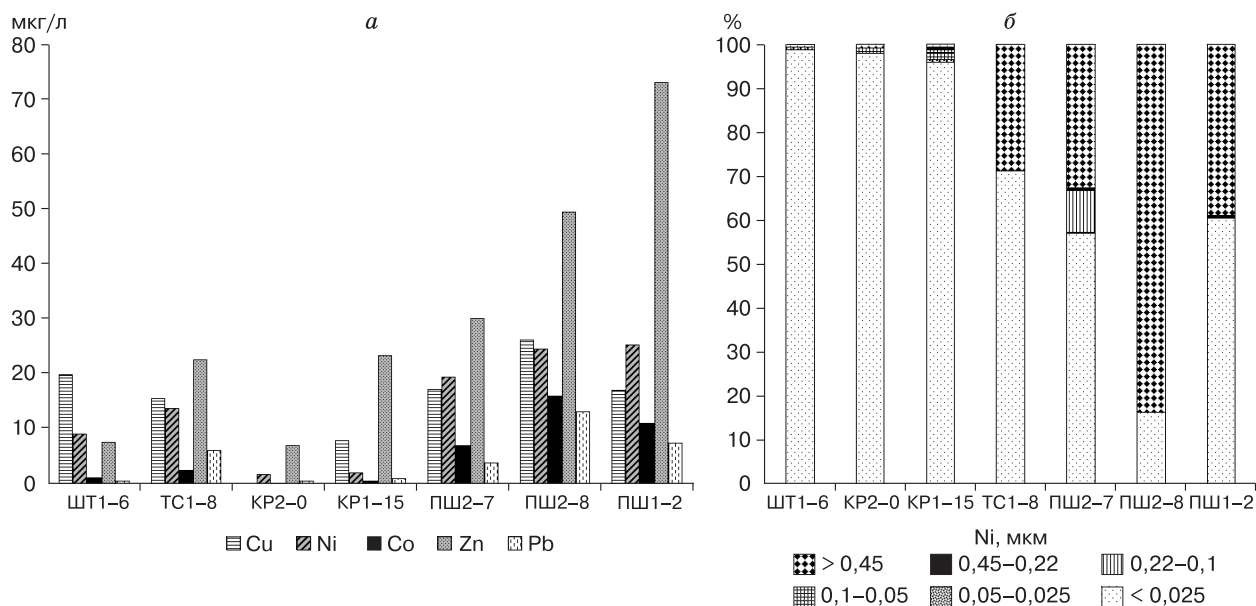


Рис. 2. Вертикальное распределение Cu, Ni, Zn в почвах тундровых геохимически сопряженных элементарных геосистем (пос. Усть-Порт):

а – элювиальных, б – транзитных, в – элювиально-аккумулятивных.



**Рис. 3.** Содержание тяжелых металлов в почвенно-грунтовых водах (а) и распределение никеля по фракциям частиц микро- и наноразмерностей (мкм), выделенным из проб почвенно-грунтовых вод методом мембранной фильтрации (б).

Индексы участков: ШТ – м. Шайтанский; КР – пос. Караул; ТС – о. Тысяра; ПШ – о. Пашков. 1–6, 2–7, ... – индексы точек опробования (индекс профиля – индекс точки).

рированием. Относительное накопление тяжелых металлов, особенно Ni и Zn, выявлено в тонкодисперсных взвешенных частицах, содержащихся в грунтовых водах пойменных почв. Максимальная доля никеля (30–80 %) находится во взвешенных частицах водной фазы размером более 0,45 мкм (рис. 3)<sup>1</sup>. Грунтовые воды с высоким содержанием Ni приурочены к пойменным почвам на островах верхней дельты (о. Пашков). Это свидетельствует о барьерной функции фронтальных дельтовых геосистем при переносе загрязнителей с речными водами.

В 2010 г. проводилось исследование содержания тяжелых металлов в водах Печоры. В центре крупных протоков, где скорость течения максимальная, содержание меди и цинка незначительно и составляет в среднем 0,5 и 2,8 мкг/дм<sup>3</sup>. В малых извилистых протоках и вблизи островов дельты, гасящих скорость речного потока, концентрация тяжелых металлов увеличивается в 3–5 раз: меди – до 1,5–2,0 мкг/дм<sup>3</sup>, а цинка – до 7–15 мкг/дм<sup>3</sup>. Крупным источником загрязнения речных вод в регионе является г. Нарьян-Мар. В трех километрах ниже по течению от пос. Искателей (северная окраина города) содержание цинка в водах Печоры достигает 28 мкг/дм<sup>3</sup>, что почти

в три раза выше предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов (10 мкг/дм<sup>3</sup>).

### ВЫВОДЫ

Ландшафтно-геохимические исследования в низовьях рек Енисея и Печоры подтвердили возможность индикации техногенного загрязнения геосистем радионуклидами и тяжелыми металлами от источников глобального и регионального происхождения. Островные геосистемы фронтальной части дельты могут играть роль барьера на пути переноса веществ-загрязнителей с речным стоком. Выявлены особенности накопления загрязняющих веществ в различных компонентах геохимически сопряженных геосистем, что можно использовать при индикации и мониторинге загрязнения.

Авторы выражают глубокую благодарность экипажу НИС “Академик Борис Петров”, сотрудникам СевПИПРО за оказание помощи в организации экспедиционных исследований, которые были проведены в рамках проекта ИНКО-КОПЕРНИКУС “Истэблиш” и при финансовой поддержке ОНЗ РАН и РФФИ (проекты 08-05-00872; 10-05-10027к).

<sup>1</sup> Фракции менее 0,45 мкм обычно относят к природным почвенным растворам. В сущности, они являются растворами дисперсии почвенных частиц, что и показывает метод мембранной фильтрации.

## Литература

- Атлас** радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины. М., Федер. служба геодезии и картографии России, Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 1998, с. 12–13.
- Ермаков С.Ю., Украинцева Н.Г.** Опыт биологической рекультивации территории Пеляткинского нефтегазо-конденсатного месторождения // Биосферные функции почвенного покрова: Тез. докл. конф., Пушино, 2005, с. 33–34.
- Кузнецов Ю.В., Легин В.К., Струков В.Н. и др.** Трансурановые элементы в пойменных отложениях р. Енисей // Радиохимия, 2000, т. 42, № 5, с. 470–477.
- Нифонтова М.Г.** Содержание долгоживущих искусственных радионуклидов в мохово-лишайниковом покрове горно-растительных сообществ // Экология, 2000, № 3, с. 202–205.
- Резолюция** международного Печорского симпозиума “Эко-системы дельт крупных рек Евразии” (Сыктывкар, Респуб-лика Коми, Россия, 11–15 сент. 2000 г.). (<http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-38/08.html>).
- Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М. и др.** Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине р. Енисей. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 287 с.
- Шкинев В.М.** Мембранные методы в геохимических исследованиях // Материалы V Междунар. шк. по наукам о Земле ISES-2009, 30 с. (<http://www.ises.su/2009>).
- Korobova E.M., Ukraintseva N.G., Brown J., Standing W.** Radionuclide distribution in the Lower Yenisey and Pechora Reaches: Landscape geochemical signatures and patterns of global and regional contamination // River Pollution Research Progress / Ed. by M.N. Gallo, M.H. Ferrari. N.Y., NOVA Publ., 2009, p. 91–156.
- Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I. et al.** Radioactive contamination of the Yenisei river // J. Environ. Radioactivity, 1995, vol. 29, No. 3, p. 225–236.

*Поступила в редакцию  
14 февраля 2011 г.*