

УДК: 574.2.043

## РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЧАТКИ НА ФОНОВОМ УРОВНЕ И В ЗОНАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2013 Ю.С. Литвиненко<sup>1</sup>, Л.В. Захарихина<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «ЭкоГеоЛит», Москва, 119330;<sup>2</sup>Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683002; e-mail: zlv63@yandex.ru

Фоновые концентрации Th и U в почвах и поверхностных водах Камчатки существенно ниже их кларков для указанных природных сред. Уровень мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) у поверхности Земли (в среднем 10–11.5 мкР/ч на юге и 8–9.5 мкР/ч на севере полуострова) уступает естественному уровню этого показателя для открытых горных территорий средней полосы России. Удельная активность <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K в донных отложениях водотоков не превышает типичные значения природного фона для почв, грунтов и горных пород. Естественные радиогеохимические фоны исследованных природных сред Камчатки обусловлены, в первую очередь, составом вулканических пеплов, слагающих минеральную основу почв полуострова. Они выше в пределах Южной почвенной провинции относительно Северной провинции полуострова. Радиогеохимические аномалии и аномальные значения МЭД пространственно приурочены к известным сульфидным медно-никелевым рудным объектам Камчатского края. Это позволяет рекомендовать радиометрическое обследование территорий в качестве дополнительного метода в составе комплекса традиционных методов поисков сульфидных медно-никелевых месторождений на Камчатке.

*Ключевые слова:* уран, торий, гамма-излучение, медно-никелевое оруденение Камчатки.

### ВВЕДЕНИЕ

Все имеющиеся научные исследования естественной радиоактивности на Камчатке посвящены, в первую очередь, ее связи с горными породами, вулканической деятельностью и современными гидротермальными процессами (Адамчук, и др., 1986; Андреев, 2011; Пузанков и др., 1977; Шаврова, 1937). Вместе с тем, остаются малоизученными вопросы общего радиогеохимического фона компонентов природной среды на обширных территориях полуострова за пределами вулканических построек и очагов разгрузки парогидротермальных систем. Отсутствуют данные о содержании радиоактивных элементов в перенесенных на дальние расстояния вулканических пеплах, почвах на них образованных, природных водах и донных отложениях региона, как на фоновых площадях, так и в аномальных полях рудопроявлений и месторождений полезных ископаемых.

Исследования фоновой радиоэкологической обстановки на Камчатке особенно актуальны

сегодня в связи с произошедшей в марте 2011 г. аварии и продолжающимися до настоящего времени экологическими проблемами на атомной электростанции «Фукусима-1» в Японии.

Основной целью исследований является установление фоновых радиоэкологических характеристик компонентов природной среды Камчатки и геохимических параметров отклонений от них в рудных районах полуострова.

Для выполнения цели решались следующие задачи:

1) изучение закономерностей распределения тория и урана в почвах, поверхностных водах и донных отложениях водотоков Камчатки;

2) исследование уровней мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения у поверхности Земли в разных районах и ландшафтах Камчатки;

3) определение удельной активности <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K в донных отложениях;

4) определение параметров радиогеохимических аномалий в рудных районах полуострова.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Многолетние исследования генезиса и геохимических особенностей почв Камчатки позволили нам ранее выделить на территории полуострова Южную и Северную провинции, почвы которых унаследовали геохимические характеристики от вулканических пеплов различного петрохимического состава, на которых они сформировались (Литвиненко, Захарихина, 2008). В этой связи, радиоэкологические исследования территориально привязывались к выделенным почвенным провинциям.

Почвы Южной провинции развиты преимущественно на кислых пеплах вулканов южной Камчатки (Опала, Ксудач, кальдера Курильское озеро), находившихся при голоценовых извержениях в зрелой кальдерообразующей стадии развития. В отличие от почв северных территорий полуострова характеризуются более низким содержанием большинства химических элементов, слабой степенью насыщенности основаниями, более кислой реакцией среды, при относительно большем содержании гумуса и хорошо выраженных иллювиальных процессах.

Почвы Северной провинции образованы на пеплах преимущественно базальтового и андезитового составов современных извержений вулканов Северной группы Камчатки (Шивелуч, Толбачик, Безымянный, Ключевская сопка), находящихся в ранней базальтоидной стадии развития. Почвы имеют более богатый общий микроэлементный состав, относительно повышенную степень насыщенности основаниями и более основную реакцию среды. Содержание гумуса в них пониженное, иллювиальные процессы не выражены (Захарихина, 2005)

В настоящей работе обобщены данные разносторонних радиоэкологических наблюдений, проводившихся с 2006 по 2013 гг. в различных районах Камчатки (рис. 1).

В типичных ландшафтных условиях полуострова изучены закономерности распределения Th и U в поверхностном органогенном горизонте почв (валовые содержания и их подвижные формы), свежих илисто-супесчаных фракциях донных отложений и поверхностных водах, оценена удельная активность радиоактивных изотопов K, Ra, Th, Cs в донных отложениях и установлены средние значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) над поверхностью Земли. Исследования проведены в разных районах Камчатки, наиболее детально на семи ключевых участках, представляющих собой среднегорные территории вблизи известных медно-никелевых и золоторудных месторождений и рудопоявлений. В Южной провинции: участок «Шануч», включающий рудное поле

медно-никелевого месторождения Шануч и рудопоявление «Геофизическое»; участки рудопоявлений «Медвежий», «Тундровый», «Аннабергитовый» и «Северный», включающие одноименные медно-никелевые рудопоявления в западных отрогах Срединного хребта Камчатки, и участок «Порожистый» в окрестностях одноименного золото-серебряного рудопоявления (южная Камчатка). В Северной провинции: участок «Озерновский», охватывающий рудное поле и окрестности Озерновского золоторудного месторождения (северо-восточное предгорье Срединного хребта) (рис. 1).

Исследования проводились, как в зонах воздействия рудных объектов, так и на прилегающих к ним фоновых площадях на достаточном удалении от геохимических аномалий. Изученные участки имеют гипсометрические отметки: от 200-300 м (долины рек) и до 900-1200 м (водоразделы).

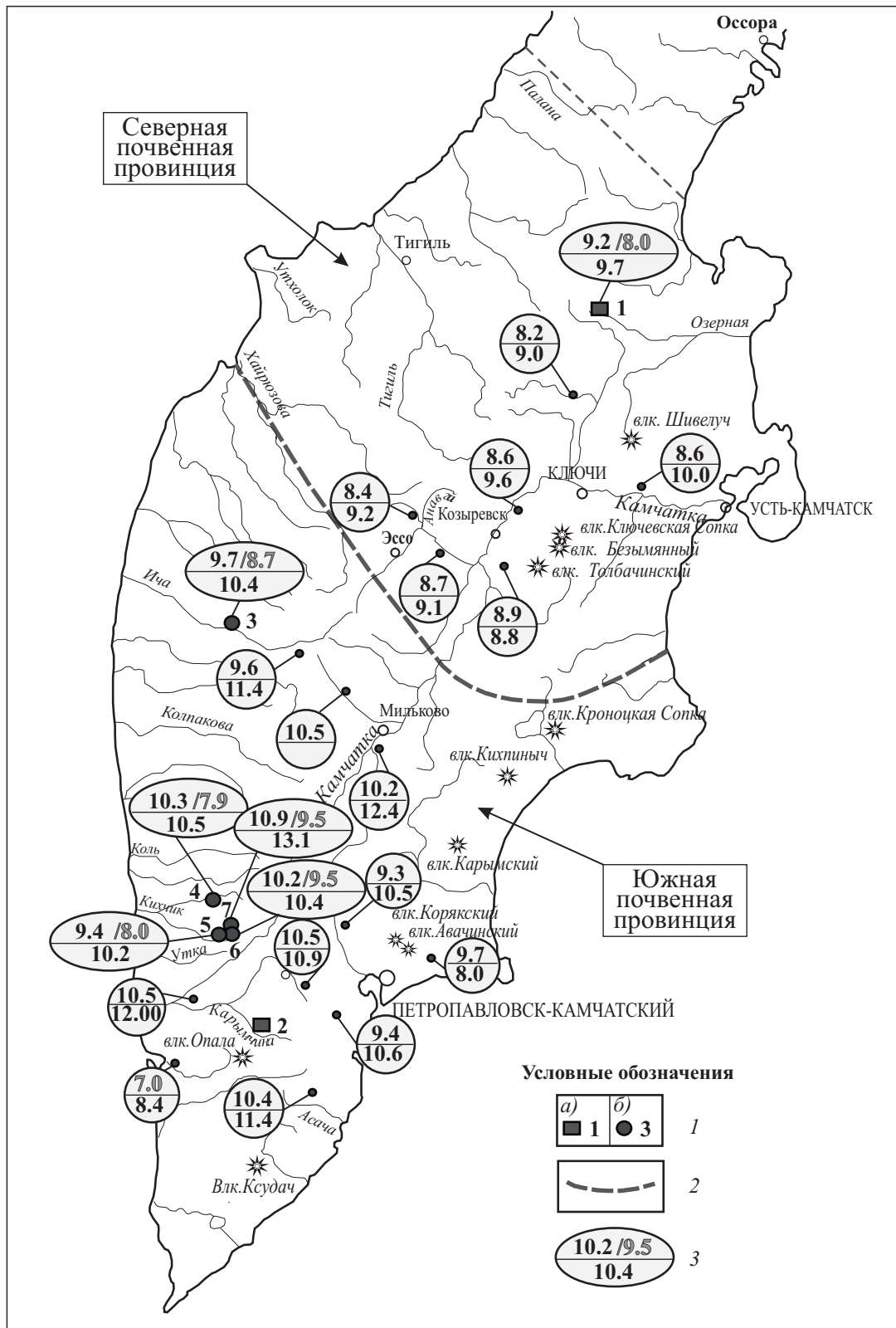
Валовые содержания Th и U в почвах, донных отложениях и их концентрации в природных водах и фильтрате талых вод определялись масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

При определении растворимых форм Th и U в почвах анализировалась ацетатно-аммонийная вытяжка (pH = 4.8) масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) без разложения.

Определения удельной активности радионуклидов:  $^{40}\text{K}$  (Калий-40),  $^{226}\text{Ra}$  (Радий-226),  $^{228}\text{Ra}$  (Радий-228),  $^{224}\text{Ra}$  (Радий-224),  $^{232}\text{Th}$  (Торий-232),  $^{137}\text{Cs}$  (Цезий-137) в донных отложениях водотоков выполнены с использованием гамма-спектрометра «Ortec-65195-P/DSPecPlus».

МЭД гамма-излучения измерялась на высоте 0.1 м над поверхностью Земли дозиметром ДРГ-01Т1, проходившим регулярную ежегодную поверку. В каждой точке наблюдений производилось от 5 до 8 замеров с последующим осреднением. В опорных пунктах наблюдений за пределами ключевых участков, как правило, проводились по 5 замеров в 5 разбросанных точках наблюдений в радиусе 40-50 м.

По паспортным данным дозиметр ДРГ-01Т1 в режиме работы «Измерение» обеспечивает снятие показаний МЭД в диапазоне от 0.010 мР/ч до 9.999 Р/ч, то есть в области значений измеряемой величины с нормированными допускаемыми погрешностями прибора. Предел допустимой основной относительной погрешности (для 95% доверительного интервала) в режиме работы «Измерение» составляет 15%, а действительная погрешность по данным приемосдаточных испытаний завода изготовителя в рассматриваемом поддиапазоне – 6%.



**Рис. 1.** Обзорная карта радиоэкологических исследований: 1 – участки детальных работ, включающие известные рудные объекты, и их номера на карте: а) – золото-серебряные (1 – «Озерновское» месторождение; 2 – рудопроявление «Порожистое»), б) – сульфидные медно-никелевые (3 – рудное поле месторождения «Шануч», включающее рудопроявление «Геофизическое»; 4 – рудопроявление «Тундровое»; 5 – рудопроявление «Медвежье»; 6 – рудопроявление «Аннабергитовое»; 7 – рудопроявление «Северное»); 2 – условная граница между Северной и Южной почвенными провинциями; 3 – средние значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения у поверхности Земли: над чертой территории склона/болота, под чертой на пойменных поверхностях.

При этом фактический диапазон показаний шкалы индикатора дозиметра составляет от 0.001 мР/ч до 9.999 Р/ч, следовательно порог чувствительности дозиметра, представляющий собой минимальное значение изменения определяемой величины, которое может показать прибор (Колчков, 2011), составляет 1 мкР/час. Безусловно, измерения МЭД в диапазоне от 1 мкР/час до 10 мкР/час, не обеспечивают получение результатов, погрешности которых не превышают границ, заданных паспортными данными дозиметра, с необходимой достоверностью. В какой-то степени повысить достоверность замеров в этом интервале позволяет усреднение большого количества измерений.

Проведенные исследования в различных районах Камчатки показали, что значительное количество единичных замеров МЭД гамма-излучения, выполненных дозиметром ДРГ-01Т1, и осредненных величин МЭД для точек наблюдений находятся в диапазоне от 4 мкР/час до 10 мкР/час.

При этом отмечают довольно устойчивые и низкие значения стандартных отклонений ( $\sigma$ ) от средних величин различных расчетных выборок, включающих замеры гамма-излучения ниже 10 мкР/час, составленных для определения местных и региональных фонов МЭД. Установлена высокая степень сходимости МЭД при выполнении неоднократных повторных замеров в таких точках и замеров в разных точках для одинаковых ландшафтных условий (например, при обследовании болот). Все выше сказанное позволило нам, с определенной долей условности, использовать в работе измерения МЭД, имеющие значения ниже заданного нижнего предела измерения дозиметра.

По статистическим показателям (асимметричность, эксцесс и коэффициент асимметричности Пирсона) было установлено, что содержания элементов во всех средах на однородных фоновых площадях аппроксимируется нормальным законом распределения. Соответственно параметры регионального геохимического фона Th и U для компонентов природной среды определялись путем расчета по фоновым выборкам среднеарифметических значений содержаний этих элементов (Сф) и стандартного отклонения ( $\sigma$ ). Минимально аномальные содержания Th и U для единичных точек опробования природных объектов рассчитаны по формуле  $Ca1 = Cф + 3\sigma$ . Для оценки геохимической активности Th и U в природных процессах установлены безразмерные геохимические показатели:

- кларки концентрации элемента  $K_k = Cф/кларк$ ;
- коэффициент концентрации элемента  $K_c = C_{max}/Cф$ ;

- общий размах значений содержаний элемента  $R = C_{max} / C_{min}$ .

Кларки концентрации (Кк) тория и урана для минеральных почв и природных вод исследуемых территорий – это отношение фоновых валовых концентраций химических элементов в этих средах к их общей распространенности (кларкам) в почвах и природных водах континентов.

Для оценки степени однонаправленности или расхождения поведения Th и U в геохимических процессах для всех исследуемых сред рассчитано Th/U отношение.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ФОН ПОЧВ, ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОТОКОВ КАМЧАТКИ

Установленные региональные фоновые валовые концентрации Th и U в минеральных почвах и природных водах обеих почвенных провинций (табл. 1) существенно ниже кларков этих элементов в тех же средах: в почвах континентов Th – 6.5 г/т, U – 1.5 г/т (Ярошевский, 2004) и в речных водах Th – 0.1 мкг/л, U – 0.5 мкг/л (Соловов и др., 1990). Наиболее низкие значения кларков концентрации ( $K_k = 0.036$  и менее) отмечаются для поверхностных вод Камчатки.

Результаты расчетов основных геохимических параметров и показателей распределения содержаний тория и урана в почвах, поверхностных водах и донных отложениях водотоков в пределах выделенных почвенных провинций Камчатки показали повышенный общий геохимический фон Th и U в природных средах Южной провинции относительно северных районов полуострова (табл. 1).

Исключение составляют почвы торфяных болот, характеризующиеся более высоким фоном U в Южной провинции (превышение 1.40 раз), а Th – на севере полуострова (превышение 1.55 раз). Нарушение этой закономерности для торфяных почв может быть объяснено их органогенной природой, отсутствием тесной генетической связи мощных торфяных горизонтов с редкими маломощными минеральными прослоями вулканических пеплов и, как следствие, повышенной ролью биогеохимических процессов. Изучение поведения Th и U в биогеохимических процессах не входит в настоящую работу и является предметом самостоятельных исследований.

В поверхностных водах территорий обеих провинций Камчатки средние фоновые содержания Th и U крайне малы. При этом содержания Th в большинстве обследованных водотоках оказались ниже предела обнаружения анализа, что не позволило определить достоверные по-

**Таблица 1.** Геохимические параметры и показатели содержаний Th и U в природных средах в пределах почвенных провинций Камчатки.

Показатели и параметры	Th		U	
	Южная провинция	Северная провинция	Южная провинция	Северная провинция
1	2	3	4	5
<b>Минеральные почвы (валовые содержания)</b>				
Региональный фон (Сф), мг/кг	2.063	1.191	0.763	0.579
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	1.016	0.483	0.416	0.249
Размах содержаний в фоновой выборке, мг/кг	0.280-4.300	0.200-2.200	0.130-1.700	0.088-1.200
Количество проб в фоновой выборке, n	45	131	44	131
Кларк концентрации, $K_k = C_f / \text{кларк}$	0.32	0.18	0.51	0.39
Минимально аномальное содержание (Ca1), мг/кг	5.111	2.639	2.011	1.325
Максимальное содержание (Cmax), мг/кг	5.6	2.2	50	1.2
Максимальный коэффициент концентрации $K_{c_{max}}$	2.71	1.85	65.53	2.07
Общий размах содержаний $R = C_{max} / C_{min}$	20.00	11.00	384.62	13.64
<b>Минеральные почвы (подвижные формы)</b>				
Региональный фон (Сф), мг/кг	0.025	0.019	0.039	0.033
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	0.018	0.013	0.021	0.022
% подвижных форм в валовом количестве	1.21	1.60	5.11	5.70
Размах содержаний в фоновой выборке, мг/кг мг/кг	0.004-0.059	0.001-0.048	0.001-0.100	0.002-0.094
Количество проб в фоновой выборке, n	16	44	15	45
Минимально аномальное содержание (Ca1), мг/кг	0.079	0.056	0.102	0.100
Максимальное содержание (Cmax), мг/кг	0.059	0.07	0.36	0.094
Максимальный коэффициент концентрации $K_{c_{max}}$	2.36	3.68	9.23	2.85
Общий размах содержаний $R = C_{max} / C_{min}$	14.75	70.00	360.00	47.00
<b>Торфяные почвы (валовые содержания)</b>				
Региональный фон (Сф), мг/кг	0.349	0.54	0.414	0.295
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	0.193	0.235	0.203	0.069
Размах содержаний в фоновой выборке, мг/кг мг/кг	0.170-0.818	0.300-0.880	0.120-1.157	0.200-0.360
Количество проб в фоновой выборке, n	14	8	10	8
Минимально аномальное содержание (Ca1), мг/кг	0.928	1.247	1.023	0.503
Максимальное содержание (Cmax), мг/кг	3.1	0.88	28	0.36
Максимальный коэффициент концентрации $K_{c_{max}}$	8.88	1.629	67.63	1.22
Общий размах содержаний $R = C_{max} / C_{min}$	18.24	2.93	563.58	1.80
<b>Поверхностные воды</b>				
Региональный фон (Сф), мкг/л	<0.002	<0.002	0.018	0.006
% значений выше предела обнаружения	17.8	3	88.7	63.5
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	—	—	0.01	0.003
Размах значений фоновой выборки, мкг/л	<0.002	<0.002	<0.002-0.053	<0.002-0.021
Количество проб в фоновой выборке, n	225	96	238	96
Кларк концентрации $K_k = C_f / \text{кларк}$	<0.02	<0.02	0.036	0.012
Минимально аномальное содержание (Ca1), мкг/л	>0.002	>0.002	0.048	0.015
Максимальное содержание (Cmax), мкг/л	0.91	0.19	17	0.16
Максимальный коэффициент концентрации $K_{c_{max}}$	~910*	~190*	944.44	26.67
Общий размах содержаний $R = C_{max} / C_{min}$	>455	>95	>8500	>80



Таблица 1. Окончание

Донные отложения				
Региональный фон (Сф), мг/кг	3.014	1.178	1.067	0.504
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	1.429	0.248	0.59	0.087
Размах содержаний в фоновой выборке, мг/кг мг/кг	0.340-6.100	0.530-1.700	0.130-2.800	0.260-0.710
Количество проб для расчета фона, n	39	33	35	33
Минимально аномальное содержание (Ca1), мг/кг	7.301	1.921	2.838	0.763
Максимальное содержание (Cmax), мг/кг	9.1	2.2	17	0.95
Максимальный коэффициент концентрации $K_{c_{max}}$	3.019	1.868	15.94	1.886
Общий размах содержаний $R = C_{max} / C_{min}$	26.76	4.15	130.77	3.65

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом сертификационном испытательном центре «Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ВИМС), г. Москва, «\*» – учитывая малое количество значащих содержаний Th в поверхностных водах за Сф при расчете  $K_{c_{max}}$  условно принята половина предела обнаружения ИСП метода.

казатели его регионального гидрогеохимического фона. Для этого элемента можно отметить бóльшую встречаемость проб со значащими содержаниями (17.8% против 3%), существенно более высокую максимальную концентрацию и общий размах содержаний в водах, распространенных в пределах Южной провинции относительно Северной.

Местный гидрогеохимический фон U в поверхностных водах южных районов Камчатки в три раза выше его фоновых концентраций в водотоках Северной почвенной провинции.

Фоновые содержания Th и U в донных отложениях водотоков в пределах Северной почвенной провинции практически не отличаются от регионального фона для развитых здесь минеральных почв. В донных отложениях водотоков Южной провинции установлены превышения фоновых содержаний обоих элементов в сравнении с минеральными почвами: Th в 1.46 и U в 1.4 раза. При сопоставлении по этим геохимическим параметрам отложений водотоков провинций между собой отмечают, как и в почвах, более высокие региональные фоны Th и U в пределах Южной провинции с превышением над северными территориями, соответственно, в 2.56 и 2.12 раз. Характер изменений остальных геохимических показателей в донных отложениях обеих провинций также совпадает с их поведением в минеральных почвах.

По убыванию степени превышения фона Th и U (за исключением Th в торфяных почвах) на территории Южной почвенной провинции относительно Северной провинции, изученные природные среды, располагаются в следующем порядке: поверхностные воды – донные отложения водотоков – минеральные почвы (валовые концентрации элементов) – почвы торфяные (U) – минеральные почвы (подвижные формы элементов).

Характер изменений Th/U отношения в исследованных природных средах южных и северных территорий Камчатки выражается

в однонаправленном его убывании в ряду донные отложения водотоков – почвы минеральные (валовые содержания) – почвы торфяные (валовые содержания) – почвы минеральные (подвижные формы) – поверхностные воды (табл. 2). Полученный ряд обнаруживает наличие явной закономерности, связанной с ролью воды в формировании радиогеохимических свойств рассматриваемых природных сред. В свою очередь последнее связано со значительно более высоким значением коэффициента водной миграции у U (3.1) относительно Th (0.07) (Соловов и др., 1990). Учитывая бóльшую геохимическую подвижность урана в средах, можно говорить о том, что падение значений Th/U отношения обусловлено главным образом опережающим ростом содержаний U.

Приоритетное положение донных отложений водотоков в ряду природных сред, ранжированных по убыванию средней величины Th/U отношения, может быть объяснено интенсивным вымыванием из них U проточной водой. Последнее место в ряду поверхностных вод Камчатки является следствием значительно более активного накопления в них U относительно Th за счет более интенсивного вымывания первого из всех сред, контактирующих с водой (горные породы, почвы и донные отложения).

Безусловно, повышенный общий геохимический фон Th и U в природных средах Южной провинции относительно северных районов полуострова связан с разным петрохимическим составом вулканических пеплов, залегающих в почвенно-пирокластическом чехле этих территорий. Почвы Южной провинции сформированы преимущественно на пеплах кислого состава, которые по своей принадлежности к кислым магматическим породам имеют более высокие кларки рассматриваемых элементов, относительно пеплов среднего и основного составов, являющихся минеральной основой для почв Северной провинции.

Формируясь за счет вулканических пеплов,

**Таблица 2.** Отношения Th/U в природных средах почвенных провинций Камчатки.

Природные среды	Th/U	
	Южная провинция	Северная провинция
Донные отложения водотоков	2.82	2.34
Почвы минеральные (валовые содержания)	2.70	2.06
Почвы торфяные (валовые содержания)	0.84	1.83
Почвы минеральные (подвижные формы)	0.64	0.58
Поверхностные воды	<0.11	<0.33

и обладая депонирующими свойствами, почва является основным связующим звеном между пеплами и другими компонентами природной среды. Пеплы и почвы региона определяют геохимические свойства донных отложений водотоков, составляя большую часть их мелкой фракции, которые в свою очередь влияют на особенности гидрогеохимического состава природных вод Камчатки.

Питание поверхностных вод Камчатки смешанное — доля снегового и дождевого питания соответственно 30-35% и 5-10% от общего объема стока. Остальная часть приходится на подземное питание — основное и сезонное. Основной подземный сток в годовом цикле достигает минимальных значений к концу зимы. Усиление сезонного подземного питания происходит в теплый период года с максимумом в августе-сентябре за счет инфильтрации талых вод и выпадения дождей.

Атмосферные осадки, участвующие в питании природных вод Камчатки, при отсутствии их контакта с рудными и иными геохимическими аномалиями, формируют фоновый гидрогеохимический состав, проходя через мощный почвенно-пирокластический чехол. В зимнее время они обогащаются элементами от регулярно поступающих на снежный покров свежих вулканических пеплов, богатых, как известно, растворимыми формами элементов в том числе и радиоактивных, легко переходящими в талые воды.

### ФОНОВАЯ МОЩНОСТЬ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Вариации мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения на высоте 0.1 м над поверхностью Земли в пределах Южной и Северной почвенных провинций Камчатки изучены в различных ландшафтных условиях на ключевых участках и частично за их пределами (рис. 1).

Массивы результатов замеров гамма-излучения в обеих провинциях были разбиты по основным ландшафтным условиям расположе-

ния точек наблюдений: склон, пойма и болото. Проверка закона распределения значений в полученных выборках по показателям описательной статистики (асимметричность, эксцесс и коэффициентам асимметричности Пирсона) показала, что во всех из них оно подчинено нормальному закону. В соответствии с этим были рассчитаны фоновые величины МЭД гамма-излучения для ландшафтов в пределах участков и в целом по провинциям как среднеарифметические значения рассматриваемых совокупностей данных (табл. 3).

В связи с малыми расхождениями полученных фоновых величин МЭД для различных ландшафтных условий обследованных территорий проведена проверка значимости этих различий с помощью двухвыборочного *t*-критерия Стьюдента, учитывая близость дисперсий данных в сравниваемых выборках по *F*-критерию Фишера (Родионов и др., 1987).

Для обеих почвенных провинций Камчатки установлены две наиболее общие закономерности статистически значимых вариаций гамма-излучения в различных ландшафтных условиях.

1. На всей изученной территории Камчатки минимальные значения гамма-фона относительно остальных ландшафтов характерны для территорий болот. Торфяные, преимущественно, олиготрофные почвы, мощность которых составляет в среднем для камчатских болот от 2 до 3.5 м, экранируют радиационный фон подстилающих пород. В самом мертвом органическом веществе концентрации радиоактивных элементов, имеющих вторичное эпигенетическое происхождение, как известно, не велики.

2. На четырех из шести ключевых участках, а также за их пределами, отмечается более высокий радиационный фон для пойменных поверхностей относительно склонов (на участках «Тундровый» и «Аннабергитовый» это превышение статистически не значимое). Обусловлено это, безусловно, поступлением на территории пойм с обширных водосборных площадей вещества, обогащенного, в том числе, и радиоактивными элементами.

В пределах Южной почвенной провинции

## РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

**Таблица 3.** Параметры и показатели мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения (мкР/ч) в разных ландшафтных условиях почвенных провинций Камчатки.

Показатели и параметры	Элементы ландшафта. Фоновые значения МЭД (мкР/ч), n – количество замеров		
	Склон	Пойма	Болото
1	2	3	4
<b>ЮЖНАЯ ПРОВИНЦИЯ</b>			
Участок «Шануч»			
Фон (Сф)	9.7 (n = 280)	10.4 (n = 120)	8.7 (n = 115)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.4	2.7	2.1
Минимально аномальное (Ca1)	16.9	18.5	15.0
Участок «Северный»			
Фон (Сф)	10.9 (n = 85)	13.1 (n = 30)	9.5 (n = 22)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.3	3.1	1.6
Минимально аномальное (Ca1)	17.8	22.4	14.3
Участок «Тундровый»			
Фон (Сф)	10.3 (n = 30)	10.5 (n = 50)	7.9 (n = 29)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.5	2.7	2.3
Минимально аномальное (Ca1)	17.8	18.6	14.8
Участок «Медвежий»			
Фон (Сф)	9.4 (n = 235)	10.2 (n = 145)	8.0 (n = 36)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.5	2.9	2.0
Минимально аномальное (Ca1)	16.9	18.9	14.0
Участок «Аннабергитовый»			
Фон (Сф)	10.2 (n = 200)	10.4 (n = 70)	9.5 (n = 25)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.0	2.5	2.4
Минимально аномальное (Ca1)	16.2	17.9	16.7
За пределами участков			
Фон (Сф)	9.7 (n = 255)	11.5 (n = 107)	7.1 (n = 26)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	1.8	2.3	2.2
Минимально аномальное (Ca1)	15.1	18.4	13.7
Вблизи действующих вулканов			
Фон (Сф)	9.3 (n = 50)	8.0 (n = 5)	–
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	1.9	0.7	–
Минимально аномальное (Ca1)	15.0	10.1	–
Региональный гамма-фон			
Фон (Сф)	9.8 (n = 1135)	10.7 (n = 527)	8.5 (n = 253)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.2	2.4	2.1
Минимально аномальное (Ca1)	16.4	17.9	14.8
<b>СЕВЕРНАЯ ПРОВИНЦИЯ</b>			
Участок «Озерновский»			
Фон (Сф)	9.2 (n = 160)	9.7 (n = 60)	8.0 (n = 20)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.1	2.6	1.8
Минимально аномальное (Ca1)	15.5	17.5	13.4
За пределами участков			
Фон (Сф)	9.0 (n = 127)	9.8 (n = 30)	7.9 (n = 20)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	1.8	1.8	1.7
Минимально аномальное (Ca1)	14.4	15.2	13.0



Таблица 3. Окончание

Вблизи действующих вулканов			
Фон (Сф)	8.7 (n = 83)	9.0 (n = 31)	–
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.0	2.1	–
Минимально аномальное (Ca1)	14.7	15.3	–
Региональный гамма-фон			
Фон (Сф)	9.0 (n = 370)	9.5 (n = 121)	8.0 (n = 40)
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	2.0	2.2	1.8
Минимально аномальное (Ca1)	15.0	16.1	13.4

установлено значимое возрастание средних значений МЭД на крутых склонах с близко залегающими коренными породами и на водоразделах в зоне гольцов. Так на участке Шануч на крутых склонах оно составляет 13.3 мкР/ч (количество замеров  $n = 50$ ), на склонах с развитым почвенно-пирокластическим чехлом – 9.7 мкР/ч ( $n = 280$ ). На участке «Аннабергитовый» максимальный радиационный фон 12.5 мкР/ч ( $n = 80$ ) установлен в приводораздельной части Срединного хребта Камчатки, в зоне гольцов. На склонах с почвенно-пирокластическим чехлом фоновые значения МЭД здесь снижается до 10.2 мкР/ч ( $n = 200$ ).

На участке «Озерновский» в Северной провинции различия гамма-фона на участках склона, лишенных почвенно-пирокластического чехла (9.0 мкР/ч,  $n = 78$ ), относительно элементов ландшафта с почвенным покровом (9.2 мкР/ч,  $n = 160$ ) статистически незначимое.

Проведены замеры МЭД гамма-излучения на территориях (склоны и поймы), попадающих в зону влияния действующих вулканов Камчатки. В границах Северной провинции исследования проведены на площади развития покровов молодых вулканических пеплов вулканов Ключевской, Безымянный, Шивелуч и Толбачик. В Южной провинции – на склонах вулкана Авача. Установлено, что на склонах и в поймах водотоков таких территорий наблюдается снижение средних значений МЭД гамма-излучения над поверхностью Земли относительно районов, расположенных на удалении от вулканических построек (табл. 3).

В целом выделенные ландшафтные условия обеих почвенных провинций по мере убывания величин регионального гамма-фона располагаются в одинаковом порядке: поймы – склоны – болота. Близки и соотношения фоновых значений для различных ландшафтов.

При сравнении по данным показателям Северной и Южной провинций между собой видно, что региональные фоновые значения МЭД гамма-излучения для всех рассматриваемых ландшафтных условий южной части Камчатки выше, чем на севере полуострова. Это в полной мере согласуется с отмеченной выше общей закономерностью распространенности на об-

следованных территориях тория и урана, фоновые содержания которых в природных средах Южной провинции выше, чем в Северной.

Корреляционный анализ показал отсутствие значимых связей между МЭД гамма-излучения над поверхностью Земли и валовыми содержаниями Th и U в почвах. В тоже время установлена значимая положительная корреляция такого гамма-излучения от содержания в почвах подвижных форм урана ( $r = 0.819$  при  $r_{5\%крит.} = 0.406$ ).

### УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОТОКОВ

Оценка удельной активности радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях водотоков на ключевых участках в Южной (участки «Аннабергитовый», «Медвежий», «Шануч») и Северной (участок «Озерновский») почвенных провинциях Камчатки показала следующее (табл. 4).

В донных отложениях водотоков Южной провинции средние величины и размахи значений (R) удельной активности радионуклидов составляют:  $^{226}\text{Ra}$  –  $19.5 \pm 4.8$  Бк/кг (R = 3.2);  $^{228}\text{Ra}$  –  $16.3 \pm 5.1$  Бк/кг (R = 3);  $^{224}\text{Ra}$  –  $20.0 \pm 5.0$  Бк/кг (R = 3.4);  $^{232}\text{Th}$  –  $16.8 \pm 5.3$  Бк/кг (R = 2.5) и  $^{40}\text{K}$  –  $332 \pm 63$  Бк/кг (R = 3.2). Все пробы отобраны на достаточно большом расстоянии от выходов рудных тел и геохимических аномалий. В целом можно отметить малый разброс значений рассчитанных показателей. Удельная активность техногенного  $^{137}\text{Cs}$  в 5 из 6 определений ниже предела обнаружения анализа ( $\leq 5$  Бк/кг). Значащая величина  $^{137}\text{Cs}$  –  $13 \pm 4$  Бк/кг установлена в донных отложениях руч. Сорный на участке «Шануч».

В донных отложениях водотоков Северной провинции удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , в подавляющем большинстве случаев, ниже предела обнаружения анализа ( $\leq 10$  Бк/кг) и, соответственно, заметно ниже (приблизительно в 2 раза), чем средние значения этого показателя в донных осадках Южной провинции. Средняя удельная активность  $^{40}\text{K}$  составляет –  $329 \pm 94$  Бк/кг, что практически совпадает со значением этого показателя для Южной про-

## РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

**Таблица 4.** Удельная активность радионуклидов в донных отложениях водотоков на ключевых участках, Бк/кг.

Водоток	$^{226}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ra}$	$^{224}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
<b>ЮЖНАЯ ПРОВИНЦИЯ</b>						
Участок «Аннабергитовый»						
руч. Гранатовый	11±4	≤ 8	≤ 10	≤ 10	148± 59	≤ 5
Участок «Медвежий»						
руч. Медвежий	15.7±4.9	16.2±5.6	14.5±4.8	16.2±5.6	170±51	≤ 3
руч. Лев. Порожистый	21.9±7.1	17.0±9.1	15.9±6.0	17.0±9.1	466±85	≤ 4
Участок «Шануч»						
руч. Перевальный	35 ± 5	13 ± 3	34 ± 5	13 ± 3	470± 70	≤ 3
руч. Сорный	15 ± 3	24 ± 5	25 ± 5	25 ± 5	382± 54	13 ± 4
Руч. Тройной	18.5±5.1	19.4±5.9	20.4±6.2	19.4±5.9	358±57	≤ 3
<b>СЕВЕРНАЯ ПРОВИНЦИЯ</b>						
Участок «Озерновский»						
левый приток р. Лев. Озерная	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	294±88	14±5
правый приток р. Перевальная	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	241±86	16±5
руч. Хомут	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	386±95	≤ 10
руч. Эталонный	≤ 10	≤ 10	13±5	13±5	394±107	≤ 10

Примечание: Испытания выполнены в лаборатории изотопных методов анализа Аналитического сертификационного испытательного центра Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (АСИЦ ВИМС), г. Москва.

винции. Уменьшение размаха его значений в донных отложениях Северной провинции ( $R = 1.3$ ) связано с меньшим территориальным разбросом точек опробования. Обращает на себя внимание более высокая частота встречаемости значащих величин удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (в 2-х из 4-х проб) и незначительно более высокие ее значения в донных отложениях водотоков участка «Озерновский» в Северной провинции (14±5 и 16±5 Бк/кг).

Максимальные величины удельной активности  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в донных отложениях водотоков Южной и Северной провинций не превышают типичные значения естественного природного фона для почв, грунтов и горных пород (20-50 Бк/кг для радиоактивных изотопов Ra и  $^{232}\text{Th}$ ; 200-800 Бк/кг для  $^{40}\text{K}$  (Ярошевский, 2004)).

Известно, что присутствие  $^{137}\text{Cs}$  в экосистемах полностью определяется техногенной нагрузкой, которая характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Основные потенциальные источники выбросов радиоцезия в окружающую среду, такие как полигоны ядерных испытаний и предприятия атомной энергетики, находятся в тысячах километрах от Камчатки. Поэтому можно говорить о том, что значащие величины удельной активности техногенного  $^{137}\text{Cs}$ , установленные в донных отложениях водотоков Северной и Южной провинций, связаны с его глобальным

выпадением на земную поверхность из атмосферы. Все обсуждаемые величины не превышают вариаций такого выпадения (5-25 Бк/кг), что не умоляет важности изучения поведения этого экотоксиканта в почвах, донных отложениях и других компонентах ландшафтов в районах его обнаружения.

#### РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В ПОЧВАХ, ПРИРОДНЫХ ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОТОКОВ КАМЧАТКИ

Аномальные валовые содержания Th и U установлены только в почвах Южной провинции, подавляющая часть которых как в минеральных, так и в торфяных почвах, расположена на площади медно-никелевого месторождения Шануч. За ее пределами аномальные валовые содержания Th ( $K_c = 2.6$ ) установлены на ключевом участке «Аннабергитовый» в минеральных почвах в распадке ниже выходов руд известного медно-никелевого рудопроявления.

Максимальные коэффициенты концентраций валовых содержаний Th и U на месторождении Шануч установлены в подчиненных ландшафтах, развитых ниже по рельефу от естественных выходов рудных тел. Соответственно, на сегодняшний день эти аномалии оказались ниже объектов горнодобычного участка Шанучского рудника.

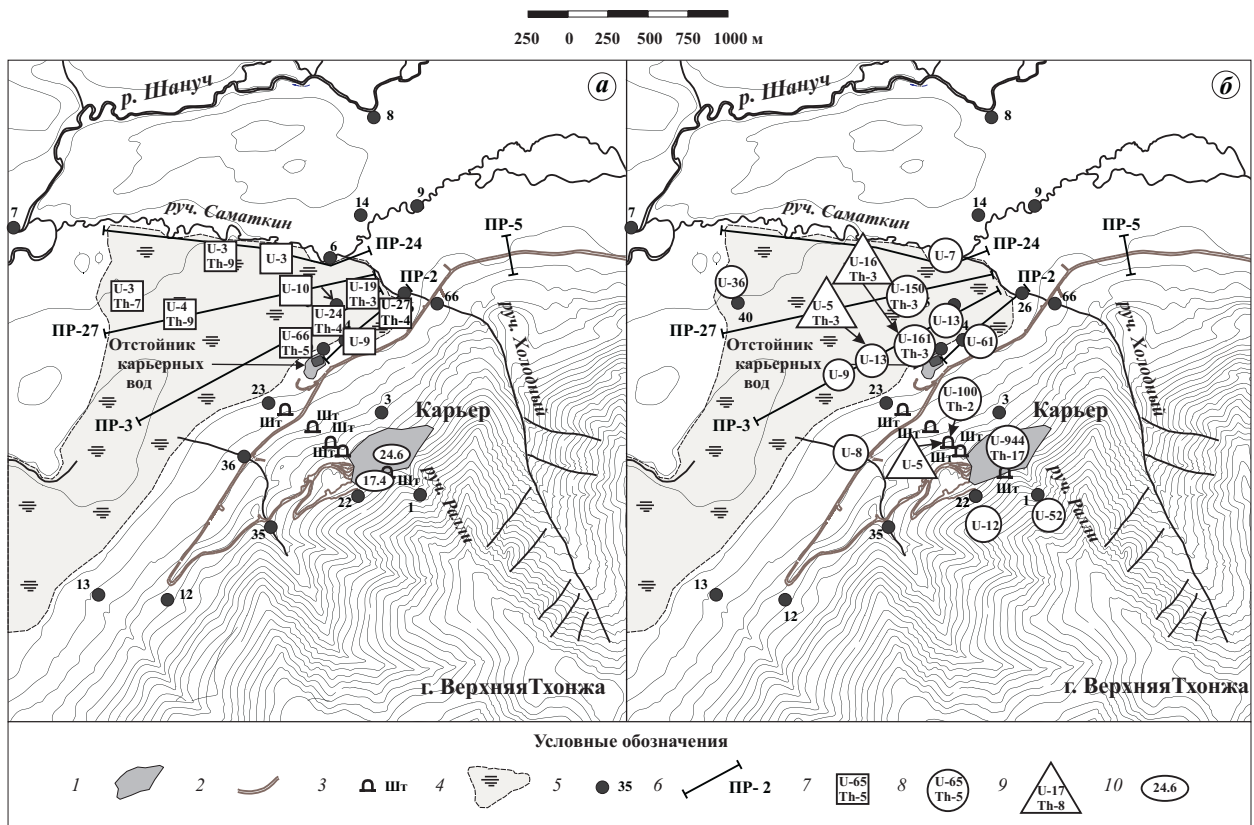
Как известно одним из основных продуктов окисления сульфидных руд является серная кислота, которая разрушает кристаллические матрицы минералов, высвобождая входящие в них химические элементы, в том числе радиоактивные, которые сносятся гипергенными водами в подчиненные ландшафты, где накапливаются в депонирующих средах. Таким образом, установленный рост концентраций радиоактивных элементов в подчиненных ландшафтах на месторождении Шануч связан, по нашему мнению, с интенсивной коррозией пороодо- и рудообразующих минералов в контурах рудных тел и их первичных геохимических ореолов.

Нельзя исключать и возможные процессы биоаккумуляции урана, в частности обладающими хорошей поглощающей способностью урана сульфатредуцирующими бактериями (Лукьянова, 2008).

Разрабатываемые рудные тела месторождения, отработанный карьер и действующие штольни расположены в нижней части северного склона горного массива Верхняя Тхонжа с абсолютной отметкой 1025 м. К подножью горы при-

мыкает южная окраина низинного Шанучского болота, которое с севера ограничено долиной руч. Саматкин (левого притока р. Шануч). Воды ручьев, стекающих с северного склона горного массива и дренирующих месторождение Шануч, впадают в это болото, далее после фильтрации через торфяник в руч. Саматкин и далее в р. Шануч, правый приток р. Ича (рис. 2).

Один из таких мелких водотоков – руч. Ралли, размывавший до начала горнодобычных работ выходы на поверхность окисленных руд месторождения (при разработке карьера ручей был отведен в соседний водоток), поставлял в Шанучское болото повышенные количества рудных элементов. Приблизительно за 25 лет до проведения данных исследований в долине руч. Ралли, в зоне выходов рудных тел выполнялись геологоразведочные земляные работы. Вскрытый ими мелкозем, обогащенный рудными и сопутствующими элементами, был перемещен пролювиальными процессами к подножью горы. В результате на южной окраине Шанучского болота образовался техногенный конус выноса площадью ~ 400 м<sup>2</sup>, перекрывший



**Рис. 2.** Точечные радиогеохимические аномалии в поверхностных горизонтах почв (а), природных водах и донных отложениях водотоков (б) на площади медно-никелевого месторождения «Шануч»: 1 – площадные производственные объекты добычного участка Шанучского рудника; 2 – дороги; 3 – эксплуатационные штольни; 4 – площадь Шанучского низинного болота; 5 – точки радиогеохимических режимных наблюдений и оп-робования контролируемых природных сред; 6 – геохимические профили; 7-9 коэффициенты концентрации U и Th: 7 – в поверхностных горизонтах почв, 8 – в природных водах, 9 – в донных отложениях водотоков; 10 – аномальные значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения у поверхности Земли (мкР/ч).

естественный пролювиальный конус выноса ручья.

В границах этого конуса выноса располагается подавляющая часть установленных в минеральных почвах аномальных содержаний валового  $U$  с коэффициентами концентраций  $K_c$  от 6.5 до 9.4. Выявлены они в глубинном органическом горизонте этого участка, погребенном поверхностным техногенным (12 см) наносом.

Максимальный коэффициент концентрации  $K_{c_{max}} = 65.53$  для валовых содержаний  $U$  в минеральных почвах месторождения обнаружен в месте разгрузки в Шанучское болото поверхностных и грунтовых вод, поступающих с участков добычных работ рудника, в 200 м юго-западнее техногенный конус выноса ручья Ралли. Здесь же в минеральных почвах установлены единичные для месторождения аномальные содержания  $Th$  с  $K_c$  4.8–4.9.

На миграционные способности урана большое влияние оказывают изменения окислительно-восстановительного потенциала среды. Растворенный в обогащенных кислородом водах уран сносится со склона г. Верхняя Тхонжа и активно осаждается на контрастных восстановительных геохимических барьерах, возникающих при переходе окислительной обстановки на склоне в восстановительную на площади Шанучского болота.

В пределах болота, примыкающего к подножью горы с рудными телами месторождения Шануч, выделяются участки с высокими коэффициентами концентраций  $Ni$  ( $K_c = 200-400$ ) и  $Cu$  ( $K_c = 100-200$ ) для поверхностных и для глубинных горизонтов торфяных почв, а также высокими коэффициентами концентраций рудных элементов в болотных водах. Для этих аномальных зон характерны относительно пониженные показатели рН почвенной среды торфяной толщи и болотных вод относительно всей площади болотного массива (аномальные участки – рН <5, воды болота в среднем рН – 5-6.5).

Именно в пределах этих аномальных участков низинного болота распространены торфяники с наиболее высокими аномальными содержаниями  $Th$  и  $U$ . В поверхностных горизонтах торфяных почв этих зон  $K_c$  варьирует для  $U$  существенно – от 2.8 до 26.6 и имеет значения для  $Th$  – от 1.2 до 9.1 единиц.

На глубину (2.0-2.6 м) торфяная почва сложена почвенными горизонтами, степень разложения которых увеличивается сверху вниз. С поверхности развиты горизонты торфа с низкой степенью разложения, до 15%. Глубинные горизонты торфа имеют более высокую степень разложения (20-35%). Среди них встречаются прослойки торфа со значительной (до 30%) примесью тонкопесчаного и илистого

минерального вещества, привнесенного в том числе водами ручья Ралли.  $K_{c_{max}} = 67.63$  для валовых содержаний  $U$  установлен именно в таком «заиленном» торфяном горизонте на глубине 1.3 м. В целом сверху вниз по горизонтам торфяной почвы наблюдается увеличение коэффициентов концентраций как для  $U$  ( $K_c$  от 21.7 с поверхности до 36.2 и 67.6 на глубине), так и для  $Th$  ( $K_c$  от 3.1 до 3.7 и 8.0). Это может быть следствием наличия вертикальной радиогеохимической зональности у эродируемого и поставляющего в болото минеральное вещество месторождения Шануч, которая выражается в росте содержаний обоих радиоактивных элементов вверх по разрезу медно-никелевого оруденения в сторону его верхнерудной и надрудной частей. В результате глубинной эрозии месторождения и сноса продуктов разрушения в болота сначала формируются наиболее глубокие горизонты за счет надрудной части, выше – верхнерудной, затем среднерудной и т.д.

Аномальные содержания подвижных форм  $Th$  и  $U$  в почвах обеих провинций встречаются редко. Концентрация подвижных форм  $U$ , превышающая фоновое значение в 9.2 раза, обнаружена в почвах Южной провинции на площади рудного поля медно-никелевого месторождения Шануч в пойме временного водотока ниже известного рудопроявления «Геофизическое». Единственная точка с аномальным содержанием подвижных форм  $Th$  ( $K_{c_{max}} = 3.7$ ) установлена в почвах Северной провинции в пределах рудной зоны на «Озерновском» золоторудном месторождении.

Наиболее высокие значения содержания  $Th$  в природных водах обеих провинций пространственно приурочены к зонам развития золото-серебряной и медно-никелевой рудной минерализаций. В пределах Южной провинции отмечается более высокая встречаемость точек с аномальными содержаниями урана в водах (36 из 274 точек, то есть 13.1%, против 3 из 99 точек, то есть 3% на севере), значительно большие общий размах содержаний ( $R > 8500$ ) и его максимальный коэффициент концентрации ( $K_{c_{max}} = 944$ ).

Большинство точек с аномальными содержаниями  $U$  (23 из 36) обнаружены в водотоках месторождения Шануч, девять точек установлено на золото-серебряном рудопроявлении «Порожистое» и по две точки на сульфидных медно-никелевых рудопроявлениях «Геофизическое» и «Медвежье».

Гидрогеохимические аномалии  $U$  с максимальными коэффициентами концентрации обнаружены в поверхностных водах месторождения Шануч. Развиты они, также как и почвенные аномальные участки, исключительно в подчиненных ландшафтах ниже по рельефу от естественных выходов рудных тел, а на сегодняшний



день – ниже объектов горно-добычного участка Шанучского рудника.

Обращает на себя внимание значительный разброс  $K_c$  в водах месторождения – от 7.3 до 161.1, что существенно выше значений этого показателя для почв территории. Максимальные концентрации Th (0.91 мкг/л) и U (17 мкг/л) в водах установлены на медно-никелевом месторождении Шануч.  $K_{c_{max}} = 944$  для U выявлен на склоне горы в водах, непосредственно дренирующих основное рудное тело. В фильтрате атмосферных осадков после прохождения через рудный концентрат на складе готовой продукции обогатительной фабрики Шанучского рудника концентрация U повышается до 96 мкг/л ( $K_c = 5333.3$ ) при содержании Th 0.36 мкг/л.

В границах медно-никелевых рудопроявлений «Геофизическое» и «Медвежье» гидрохимические аномалии U значительно слабее. На рудопроявлении «Геофизическое» ( $K_c = 15.7-18.4$ ) они установлены в подземных водах, дренирующих известную зону рудной минерализации. На рудопроявлении «Медвежье» аномалии ( $K_c = 4.22-7.22$ ) обнаружены в поверхностных водах ниже по рельефу от рудных объектов. На золото-серебряном рудопроявлении «Порожистое» коэффициенты концентраций U в поверхностных водах варьируют от 3.2 до 11.2.

Таким образом, водные аномалии Th и U в пределах обследованных территорий Камчатки обнаруживают тесную связь с рудной минерализацией, и особенно с сульфидной медно-никелевой.

Точки с аномальными содержаниями Th и U в донных отложениях водотоков в пределах Южной провинции выявлены на площади медно-никелевого месторождения Шануч. Встречаемость их существенно ниже, чем точек с аномальными содержаниями Th и U в природных водах рудного поля. Из общей выборки, включающей 42 точки, аномальные содержания Th установлены в трех и U – в семи точках.  $K_{стх}$  Th составляет 3.02;  $K_{стх}$  U – 15.9. Все эти аномальные точки, также как почвенные и водные аномалии развиты в подчиненных ландшафтах ниже выходов рудных тел месторождения и объектов горно-добычного участка рудника.

Аномальные содержания обоих элементов в донных отложениях Се-верной провинции установлены лишь в одной точке в пределах рудного поля Озерновского золоторудного месторождения.  $K_{стх}$  Th составляет 1.87;  $K_{стх}$  U – 1.89.

Во всех случаях аномальные концентрации радиоактивных элементов в донных отложениях приурочены к зонам воздействия рудной минерализации, но их связь непосредственно с рудой менее однозначна, чем для природных вод.

Наиболее высокие коэффициенты концентраций в почвах, водах и донных отложениях всех обследованных территорий Камчатки характерны для урана, что свидетельствуют о его более интенсивном накоплении относительно тория. Аномальные содержания урана встречаются значительно чаще и выше его максимальные коэффициенты концентраций в поверхностных водах в сравнении с почвами и донными отложениями.

#### АНОМАЛИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Наиболее значительные аномальные превышения регионального фона МЭД гамма-излучения над поверхностью Земли установлены на участке «Медвежий», включающем одноименное медно-никелевое рудопроявление (рис. 1). Связаны они с выявленными «мерцающими» гамма-аномалиями: 5 аномальных точек на надпойменной террасе руч. Левый Порожистый (приток р. Лев.Кихчик) и 2 аномалии в долине его левого верхнего притока руч. Медвежий. Максимальное значение МЭД для одного замера 83 мкР/ч и максимальное среднее по 5 замерам 77.2 мкР/ч установлены в точке наблюдения на левобережном склоне долины руч. Медвежий, в 5500 м выше его устья. Вторая аномалия обнаружена у подножья правобережного склона ручья в 700 м ниже по течению со значениями для одного замера 59 мкР/ч и среднее по 5 замерам 37.6 мкР/ч.

На широкой надпойменной террасе руч. Лев. Порожистый выше устья руч. Медвежий максимальное значение МЭД гамма-излучения составляет для одного замера 67 мкР/ч и средние значения по 5 замерам от 30.6 до 44 мкР/ч.

Аномалии не обнаруживают связи с известными зонами медно-никелевой рудной минерализации. Все аномалии зафиксированы во второй половине дня. При повторных замерах с детализацией, выполненных на другой день с утра, высокие показатели не подтвердились и МЭД гамма-излучения составили от 7 до 10.4 мкР/ч.

Косвенным подтверждением наличия радиоактивных аномалий в районе участка «Медвежий» является наличие в непосредственной близости от него на запад старых канав, пройденных, по словам местных геологов, специализированной партией по поискам урана. Можно предположить, что горные работы не обнаружили источники радиоактивного излучения.

По устной информации старшего научного сотрудника Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН В.И. Андреева похожие «блуждающие аномалии» наблюдались в бассейне р. Правая Налычева, на площади Налычевских



термальных источников над поверхностью травертинового купола.

Эффект колебания или изменения уровня радиоактивности в течение суток (суточные колебания), месяца, года отмечается в целом ряде работ, посвященных этому вопросу (Пархонов, Макляев, 2004; Siegert et al., 1998). Однако однозначного ответа о причине этих явлений на сегодня не существует. Выдвигается целый ряд гипотез: приуроченность к зонам активных тектонических разломов с пульсационным поступлением к поверхности земли радиоактивных газов (радона), возможное влияние солнечной активности на активность радиационного излучения, температурного режима, влияющего на изменения состава почвенных газов, колебаниями уровня подземных вод, содержащих радиоактивные компоненты и т.п. Затронутый вопрос не входит в состав решаемых задач настоящей работы и должен являться предметом отдельных исследований.

Кроме «мерцающих» гамма-аномалий на участке «Медвежий», повышенные значения МЭД гамма-излучения в пределах Южной почвенной провинции установлены в экзоконтактовой зоне основного рудного тела медно-никелевого месторождения «Шануч» — максимум 33 мкР/ч в единичном замере и 24.6 мкР/ч в среднем по 5 замерам (см выше рис. 2). На участке «Аннабергитовый» малое, но статистически значимое относительно других ландшафтов территории, повышение МЭД гамма-излучения пространственно приурочено к одноименному медно-никелевому рудопоявлению — 20 мкР/ч в единичном замере и 16.8 мкР/ч в среднем по 5 замерам, и к центральной части перспективной восточной геофизической аномалии — 18 мкР/ч в единичном замере и 14.8 мкР/ч в среднем по 5 замерам.

На исследованных территориях в пределах Северной почвенной провинции аномальных значений МЭД гамма-излучения, превышающих естественный уровень этого показателя для открытых горных территорий средней полосы России (30 мкР/ч), не обнаружено. Значения единичных замеров гамма-излучения здесь изменяются в пределах от 6.0 до 16 мкР/ч. Средние величины МЭД по 5 замерам колеблются от 8.4 до 12.2 мкР/ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формируясь за счет вулканических пеплов, и обладая депонирующими свойствами, почва является основным связующим звеном в процессах миграции микроэлементов, в том числе радиоактивных, из пеплов в другие компоненты природной среды. В границах почвенных

провинций, выделенных ранее по петрохимическому составу, подстилающих почвы, вулканических пеплов, относительно повышенный геохимический фон Th и U в природных средах характерен для Южной провинции Камчатки, где в почвах распространены преимущественно пеплы кислого состава. Более низкий фон этих элементов отмечается для природных сред Северной провинции, где почвенный покров, образован на пеплах среднего и основного составов. Эта закономерность соответствует литературным данным по кларкам Th и U магматических пород соответствующего пеплам состава. Для территории Южной почвенной провинции характерен и более высокий общий региональный фон мощности экспозиционной дозы гамма-излучения над поверхностью Земли относительно северных территорий Камчатки.

Полученные результаты особенно актуальны сегодня в связи с произошедшей в марте 2011 г. аварии на атомной электростанции «Фукусима-1» в Японии, так как объясняют естественный характер повышенного радиоэкологического фона в природных средах на юге Камчатки относительно северных районов полуострова.

Корреляционный анализ показал отсутствие значимых связей между МЭД гамма-излучения над поверхностью Земли и валовыми содержаниями Th и U в почвах. При этом установлена тесная положительная корреляционная зависимость МЭД от содержаний в почвах подвижных форм урана.

В разных ландшафтах обеих провинций МЭД гамма-излучения имеют минимальные значения на территориях болот, где мощные торфяные горизонты экранирующие гамма-излучение подстилающих пород и вулканических пеплов, сами имеют низкие концентрации радиоактивных элементов. Более высокий радиационный фон, как правило, характерен для пойменных поверхностей относительно склонов, за счет поступления на территории пойм веществ с водосборных площадей, в том числе, обогащенных радиоактивными элементами. На склонах и водоразделах при близком залегании к поверхности горных пород величины МЭД не обнаруживают статистически значимых различий с пойменными территориями.

Удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в донных отложениях обеих провинций не превышает типичные значения естественного природного фона для почв, грунтов и горных пород. Относительно более высокий уровень удельной активности изотопов Ra и Th и более низкий уровень активности  $^{40}\text{K}$  отмечен в донных отложениях Южной провинции в сравнении с Северной. Обнаружение  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях на участке Северной провинции, вероят-

но связанное с глобальными поступлениями его из атмосферы, определяет необходимость дальнейшего изучения распространения и поведения этого экотоксиканта в почвах и других компонентах ландшафтов северных районов полуострова.

Из рассмотренных территорий Камчатки наиболее контрастные и чаще встречающиеся аномалии тория и урана в изученных природных средах характерны для площади эксплуатируемого с 2006 г медно-никелевого месторождения Шануч (западные отроги Срединного хребта Камчатки, верхнее течение р. Ича). Вблизи рудной залежи месторождения выявлены максимальный размах содержаний U ( $R = 17000$ ) и очень высокий коэффициент его концентрации ( $K_{c_{\max}} = 968$ ) в поверхностных водах.

В целом максимальные коэффициенты концентраций Th и U и большая частота встречаемости точек с их аномальными содержаниями характерны для поверхностных вод Камчатки. Более высокие максимальные коэффициенты концентраций в почвах, водах и донных отложениях характерны для урана, что свидетельствуют о его большей геохимической активности и интенсивном накоплении в сравнении с торием.

Результаты проведенных исследований показали, что слабая выраженность и низкая контрастность радиогеохимических аномалий, пространственно приуроченных к участкам локализации рудных тел на известных медно-никелевых рудопоявлениях и месторождении Шануч, не позволяют рассматривать радиометрические обследования территорий в качестве самостоятельных методов поисков медно-никелевого оруденения. В тоже время, наличие фактов совпадения радиогеохимических аномалий с участками локализации такого оруденения дает основание рекомендовать эти методы для использования в составе комплекса традиционных методов поисков сульфидных медно-никелевых месторождений, включая проведение оперативных наземных и аэрогамма-съемок.

При этом особое внимание должно быть обращено на повышенную неоднородность радиогеохимических полей, т.е. на высокие значения таких геохимических показателей, как размах содержаний радиоактивных элементов  $R = C_{\max}/C_{\min}$ , максимальный коэффициент концентрации  $K_{c_{\max}} = C_{\max}/C_{\phi}$  и размах значений МЭД гамма излучения, что является одним из косвенных признаков перспективных на медно-никелевое оруденение площадей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Грант № 13-05-00585

- Адамчук Ю.В., Карпов Г.А., Максимовский В.А. и др.* Содержание урана, тория и сопутствующих элементов (Pb, As, Hf, Sr) в породах и минеральных осадках действующей гидротермальной кальдеры Узон на Камчатке. М.: НИИАтоминформ, 1986. 35 с
- Андреев В.И.* Распределение естественных радиоактивных элементов в твердых вулканитах и радиогенных газах из вулканов и гидротерм Камчатки и Курил). Дисс.канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2011. 127 с.
- Захарихина Л.В.* Некоторые вопросы эволюции вулканических почв Камчатки // Вестник КРАУНЦ. 2005. № 5. С. 127-144.
- Колчков В.И.* Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник. М.: ФОРУМ. ИНФРА-М, 2011. 432 с.
- Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Почвенные провинции Камчатки и их геохимическая характеристика // Вестник КРАУНЦ. 2008. № 1. Вып. 11. С. 98-112.
- Лукьянова Е.А.* Микроорганизмы глубинных хранилищ жидких радиоактивных отходов и взаимодействие их с радионуклидами. Автореф. дисс. канд. биол. наук. Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН и Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН. М., 2008. 27 с.
- Пархомов А.Г., Макляев Е.Ф.* Исследование ритмов и флуктуаций при длительных измерениях радиоактивности, частоты кварцевых резонаторов, шума полупроводников, температуры и атмосферного давления // Физическая мысль России. 2004. №1. <http://www.chronos.msu.ru/relectropublications.html>.
- Пузанков Ю. М., Бобров В.А., Дучков А.Д.* Радиоактивные элементы и тепловой поток земной коры полуострова Камчатка. М.: Наука», 1977 г. 126 с.
- Родионов Д.А., Коган Р.И., Горбунова В.А. и др.* Справочник по математическим методам в геологии. М.: Недра, 1987. 378 с.
- Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др.* Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Шаврова Н.Н.* Определение радиоактивности газов побочных прорывов Ключевской сопки // Бюлл. вулканолог. Станции. 1937. № 2. С. 7-12.
- Ярошевский А.А.* Проблемы современной геохимии. Новосибирск: НГУ, 2004. 194 с.
- Siegert H., Shrader H., Schotzis U.* Half-life Measurements of Europium Radionuclides and the Long-term Stability of Detectors // Appl. Radiat. Isot. 49. 1998. P. 1397-1401.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА  
**RADIOECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF KAMCHATKA AT  
BACKGROUND LEVEL AND IN ORE OBJECTS IMPACT AREAS**

**Yu.S Litvinenko<sup>1</sup>, L.V. Zakharikhina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*EcoGeoLit Ltd., Moscow, 117447*

<sup>2</sup>*Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002*

Background concentrations of Th and U in soils and surface waters of Kamchatka are significantly lower than their clark for the mentioned natural environments. Power level of the exposure dose of gamma radiation (EDR) above the ground surface (in average, 10-11.5 mcR/h in the South and 8-9.5 mcR/h in the North of the peninsula) is significantly less than the natural level of this parameter for the open mountain territories in the central Russia. The specific activity of <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K in the bottom deposits of the water courses does not exceed the typical natural background level for soils, subsoils and rocks. Natural radiogeochemical backgrounds of studied natural environments in Kamchatka are chiefly determined by the composition of volcanic ashes, which form the mineral basis for soils on the peninsula. These backgrounds are higher within the Southern soil province compared to the Northern soil province. Radiogeochemical anomalies and abnormal EDR spatially are confined to the known sulfide copper-nickel ore objects in Kamchatka. This allows us to recommend the radiometric study of the territories as an additional method to search the copper-nickel deposits on Kamchatka.

*Keywords: uranium, thorium, gamma-radiation, background, anomalies, copper-nickel mineralization of Kamchatka.*