

## Распределение радиоактивных элементов в окружающей среде Прибайкалья (Сообщение 2. Торий и цезий-137)

В. И. ГРЕБЕНЩИКОВА, Н. А. КИТАЕВ, Э. Е. ЛУСТЕНБЕРГ, В. И. МЕДВЕДЕВ\*,  
И. С. ЛОМОНОСОВ, А. Н. КАРЧЕВСКИЙ\*\*

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а  
E-mail: vgreb@igc.irk.ru*

*\*НТП “Сосновгеос”  
664039, Иркутск, ул. Гоголя, 53  
E-mail: ssngeos@irk.ru*

*\*\*Администрация Иркутской области  
664001, Иркутск, ул. Ленина, 1а*

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты рекогносцировочной оценки распространенности и распределения радиоактивных химических элементов (Th и  $^{137}\text{Cs}$ ) в различных компонентах окружающей среды (коренные породы, почва, донные отложения, поверхностные воды) Прибайкалья. Показаны широкая распространенность и высокая изменчивость содержаний этих элементов в окружающей среде региона, которые нередко во много раз превышают региональные фоны. Установлен двойственный генезис аномальных полей: природный и техногенный.

**Ключевые слова:** радиоактивные элементы, окружающая среда, почва, вода, донные отложения, коренные породы, природные и техногенные источники.

Загрязнение верхней оболочки Земли радионуклидами и определение их генезиса (природного, техногенного и трансрегионального переноса) является одной из важнейших проблем геохимии окружающей среды [1–3].

Распределение радиоактивных химических элементов в сопряженных компонентах окружающей среды Прибайкалья изучалось на основе многоцелевого геоэкологического картирования в масштабе 1 : 1 000 000, осуществлявшегося по проекту “Геоэкология и геохимическое картирование России” [4]. На пло-

щади около 100 тыс. км<sup>2</sup> по сети (одна проба на 100 км<sup>2</sup>) определены концентрации тория в коренных породах, почвах, речных и озерных донных отложениях и поверхностных водах, а  $^{137}\text{Cs}$  – в почвах, что позволило определить соотношение их концентраций в различных компонентах окружающей среды.

Прибайкалье находится на стыке двух крупных структурных элементов земной коры: Сибирской платформы и ее складчатого обрамления, резко различающихся по строению и составу пород. Платформенная часть сложена преимущественно осадочными породами кембрийского и юрского возрастов. Складчатая область представлена метаморфическими и магматическими породами от архея до кайнозоя. Резкое различие в строении и составе двух геотектонических структур обусловило

Гребенщикова Валентина Ивановна  
Китаев Наум Анисимович  
Лустенберг Эсфирь Евгеньевна  
Медведев Всеволод Иванович  
Ломоносов Игорь Сергеевич  
Карчевский Александр Николаевич

их металлогеническую специализацию. Для платформенной части региона характерны месторождения нефти, газа, угля, соли, полиметаллов и др. В области складчатого обрамления наиболее часто встречаются месторождения и рудопоявления урана, тория, редких земель, золота и др.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Все пробы отобраны на опорных участках площадью  $1 \times 1$  км. Коренные породы опробованы штучным способом, отобраны наиболее преобладающие их разновидности (штучка массой не менее 1 кг). Отсутствие гидротермальных изменений определяли под микроскопом.

Изучены полные почвенные разрезы двух типов – в пределах аллювиальных и делювиальных отложений. В аллювиальных почвах отобраны пробы из гумусового горизонта А, мощность которого колеблется в пределах 5–20 см, в делювиальных отложениях – из гумусового горизонта А и горизонта В + С. Пробы высушивали и просеивали через сито диаметром 1 мм.

Пробы донных отложений отбирали со ступеней русловых отложений (илисто-глинистый материал). Илы расситованы на месте отбора проб мокрым способом через сито с диаметром 0,18 мм. Все пробы для анализа измельчены до 200 меш на истирателе с керамическими дисками.

Анализ проб на содержания Th и  $^{137}\text{Cs}$  осуществлен гамма-спектрометрическим методом в лаборатории ПГО “Сосновгеология” на низкофоновой установке с NaJ-детектором, акти-

вированным таллием, размером  $200 \times 200$  мм, с колодцем диаметром 70 и глубиной 100 мм. Внутрिलाбораторная ошибка воспроизводимости анализа составила от 0,5 до 4–5 %. В интервале содержаний  $>37$  Бк она не превышала 2–3 %. Систематическое относительное отклонение основного анализа от результатов контрольных измерений, выполненных в лаборатории Ф. В. Сухорукова (ОИГГМ СО РАН, Новосибирск), составило 1,15, средняя случайная ошибка – 1,45 (табл. 1). Пределы обнаружения: Th – 0,3 мг/кг;  $^{137}\text{Cs}$  – 1–5 Бк/кг. Кроме этого, в коренных породах, почвах, донных осадках и в воде (всего 250 проб) торий определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Результаты показали хорошую сопоставимость с данными, полученными гамма-спектрометрическим методом анализа.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

##### Торий

Геохимия тория, как и урана, связана с кислыми породами. Кларк тория в верхней континентальной коре по А. П. Виноградову [5] составляет 13 мг/кг, а по С. Р. Тейлору и С. М. Мак-Леннану [6] – 10,7 мг/кг. Содержание тория растет от ультраосновных пород (0,08 мг/кг), к основным (1,8 мг/кг), средним и кислым (8,3–25 мг/кг) [7]. В осадочных породах повышенное содержание тория отмечается в кварцевых конгломератах, углеродисто-глинисто-кремнистых горючих слан-

Т а б л и ц а 1

Погрешность гамма-спектрометрического анализа U, Th и  $^{137}\text{Cs}$  (выполнены лабораторией ПГО “Сосновгеология” – основной анализ и лабораторией ОИГГМ СО РАН г. Новосибирск – контрольный анализ)

Химический элемент	Количество проб	Относительные величины расхождения основного и контрольного анализов		Средняя случайная ошибка		Значения дисперсий аналитических и природной		
		систематическая	случайная	основная	контрольная	основная	контрольная	природная
U	19	0,94	1,22	1,30	1,00	0,030427	0,0	0,029145
Th	19	0,94	1,13	1,00	1,23	0,0	0,012756	0,031087
$^{137}\text{Cs}$	19	1,15	1,15	1,45	1,00	0,041103	0,0	0,846482

Т а б л и ц а 2

**Содержание (мг/кг) и статистические характеристики распределения тория в компонентах окружающей среды Байкальского региона**

Параметр	Коренные породы	Почвы			Донные отложения, фракция – 0,18 мм
		Аллювиальные, гор. А	делювиальные		
			гор. А	гор. В	
Число проанализированных проб	741	531	559	439	449
Значение: максимальное	97,0	42,34	87,97	94,58	136,15
среднее	9,05	7,16	7,22	7,93	8,45
минимальное	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Медиана	5,31	5,94	6,28	6,81	6,33
Мода	2,62	5,38	10,94	11,46	5,74
Коэффициент вариации	127	31 947	52 311	66 780	97 498
Стандартное отклонение	11,5	478,7	614,7	729,2	907,8
Дисперсия	133	229 164	377 932	531 749	824 125
Региональный фон	3,8	6,26	6,06	6,58	6,84
Кларк	14	13	13	13	–
Число проб ниже предела обнаружения	30	181	227	353	523

цах. Среднее содержание тория в почвах составляет (по А. П. Виноградову) 13 мг/кг, по Н. J. Bowen [8] – 9 мг/кг. Прослежена тенденция увеличения содержания тория в почвах верхнего горизонта А [9]. Отношение Th/U для массивных пород равно 3,5, для почв нарушается и колеблется от 4,4 до 7,8 [5, 7].

В пределах Байкальского полигона среднее содержание тория составляет: в коренных породах – 9,05, в почвах – 7,16–7,93, в донных отложениях – 8,45 мг/кг (табл. 2). Близкие содержания тория зафиксированы и в других районах Сибири. Так, в почвах в

районе г. Томска среднее содержание тория составляет 4–5,8 мг/кг при максимуме 10–14 мг/кг [10], в Западной Сибири – 9,4–10,3 мг/кг при максимуме 11,2–23 мг/кг. В почвообразующих породах содержание тория 10–10,7 мг/кг при максимуме 15,3 мг/кг [11]. Однако максимальное содержание тория в Байкальском регионе значительно выше, чем в Западной Сибири. Так, максимальная концентрация тория в коренных породах достигает 97 мг/кг, во всех типах почв содержания близки по своим значениям, вместе с тем отмечена тенденция некоторого уменьшения

Т а б л и ц а 3

**Содержание тория и торий-урановые отношения в коренных породах восточной прибрежной полосы оз. Байкал, мг/кг**

Порода	Число проб	Среднее содержание		Th/U
		тория	урана	
Габбро	8	4,3	1,8	2,4
Диориты, кварцевые диориты	25	7,0	1,4	5,0
Граниты:				
аллохтонные	134	14,1	1,3	1,1
автохтонные	15	3,4	0,6	5,6
Лейкограниты	57	13,2	2,7	4,9
Дайки:				
аплитов	14	17,4	4,5	3,9
долеритов	6	4,8	2,3	2,0
сиенит-порфиоров сыннырского комплекса	7	10,7	2,6	4,1
Граниты зазинского комплекса	5	34,5	4,8	7,2

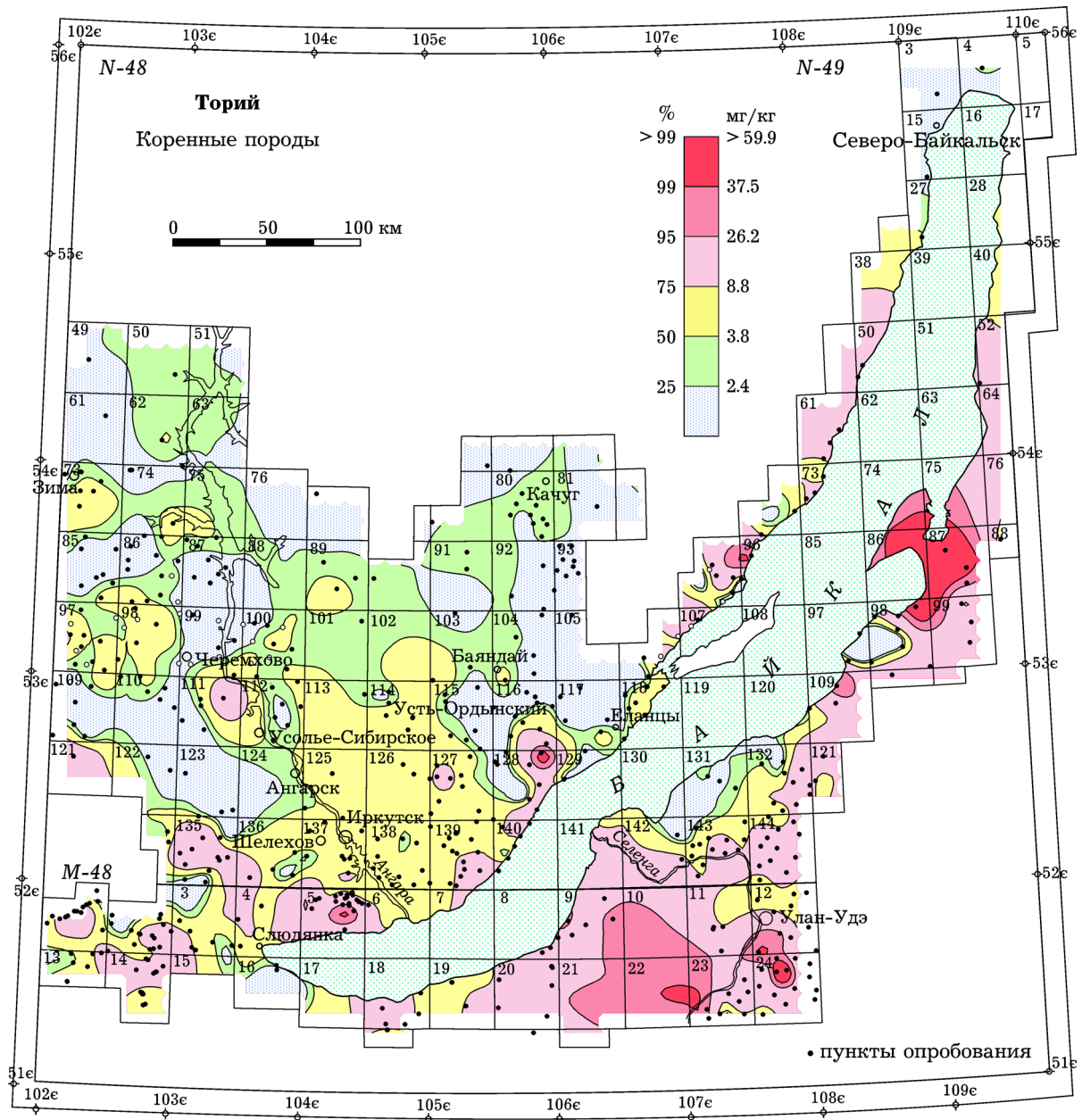


Рис. 1. Распределение концентраций тория в коренных породах Прибайкалья

содержаний тория от нижнего горизонта к верхнему и далее к верхнему горизонту пойменных почв (см. табл. 2). В целом средние содержания тория во всех средах на Байкальском полигоне ниже кларковых примерно в 1,5–2,0 раза, хотя максимальные превышают кларк в 3–7 раз.

Важным оценочным показателем состояния почв является величина торий-уранового отношения. По литературным данным и результатам исследований почв Томской об-

ласти Л. П. Рихванов и др. [10] считают, что у большинства почв различных регионов, стран и континентов, вне зависимости от их генетического типа и природно-климатических условий, это отношение колеблется на уровне 3–5, хотя в локальных участках Томской области и в районах воздействия Сибирского химического комбината оно составляет 2–3. Средние значения Th/U отношения в главных генетических типах почв Западной Сибири составляют 5,6–8,1 [11]. В Байкаль-

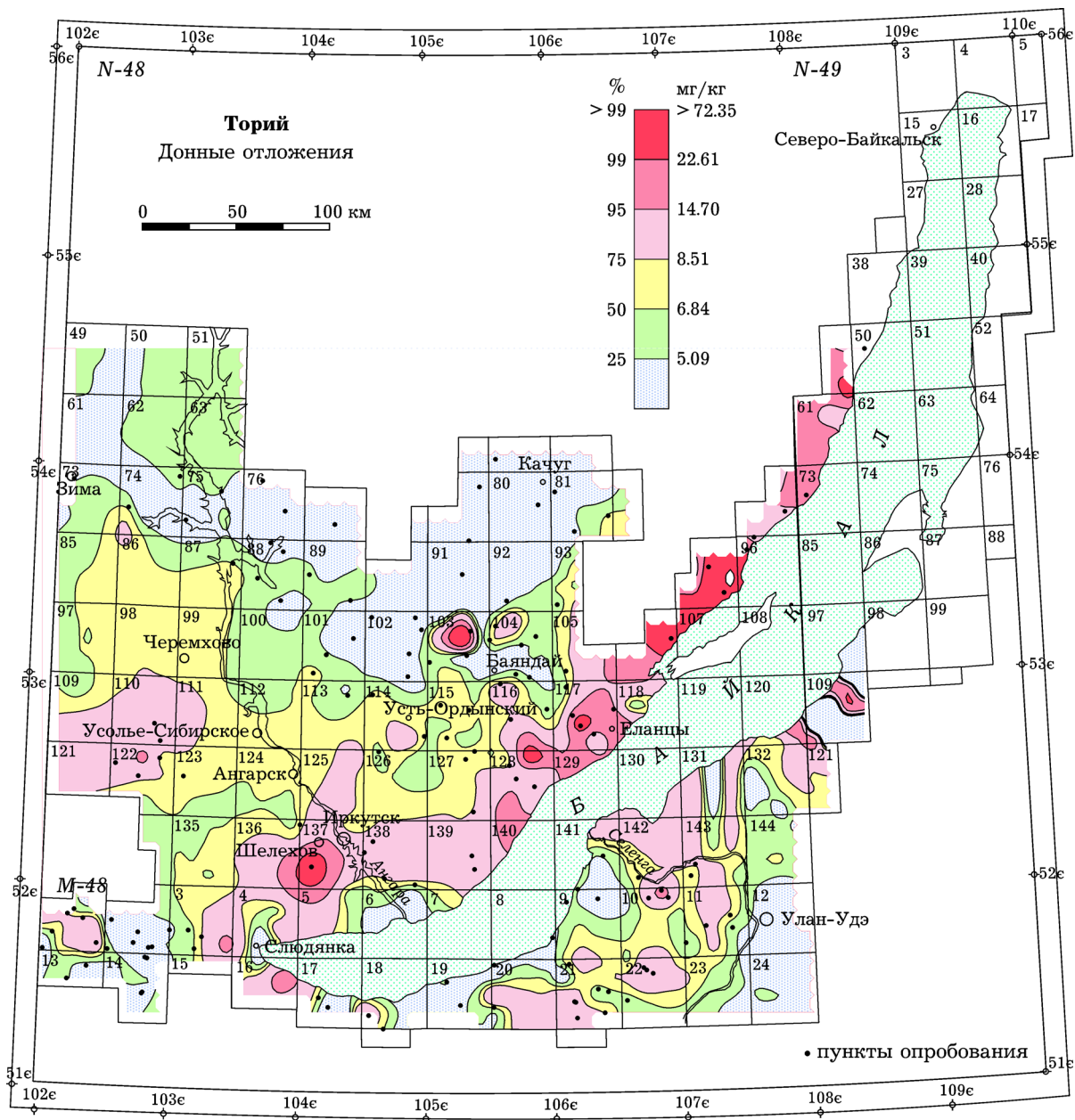


Рис. 2. Распределение концентраций тория в донных отложениях Прибайкалья

ском регионе отношение Th/U по средним значениям составляет 2–3, т. е. несколько ниже средних значений, что можно объяснить лишь более высоким средним содержанием урана в регионе [12]. Отметим, что вновь полученные данные (опробование 2007–2008 гг.) по коренным породам восточной прибрежной полосы оз. Байкал (гранитоиды Ангаро-Витимского батолита) показали, что содержание тория изменяется от 3,4 до 34,5 мг/кг (табл. 3) (в основных породах – 4,3–7,0, в

кислых – до 34,5 мг/кг), в среднем составляя 11,4 вместо 9,05 мг/кг в целом по полигону. Отношение Th/U изменяется в пределах 2,0–7,2.

Распределение тория в коренных породах (рис. 1) соответствует особенностям геологического строения региона. Пониженное относительно фона содержание характерно для карбонатно-терригенных отложений Сибирской платформы, околофоновое – для терригенных угленосных пород Иркутского бассейна

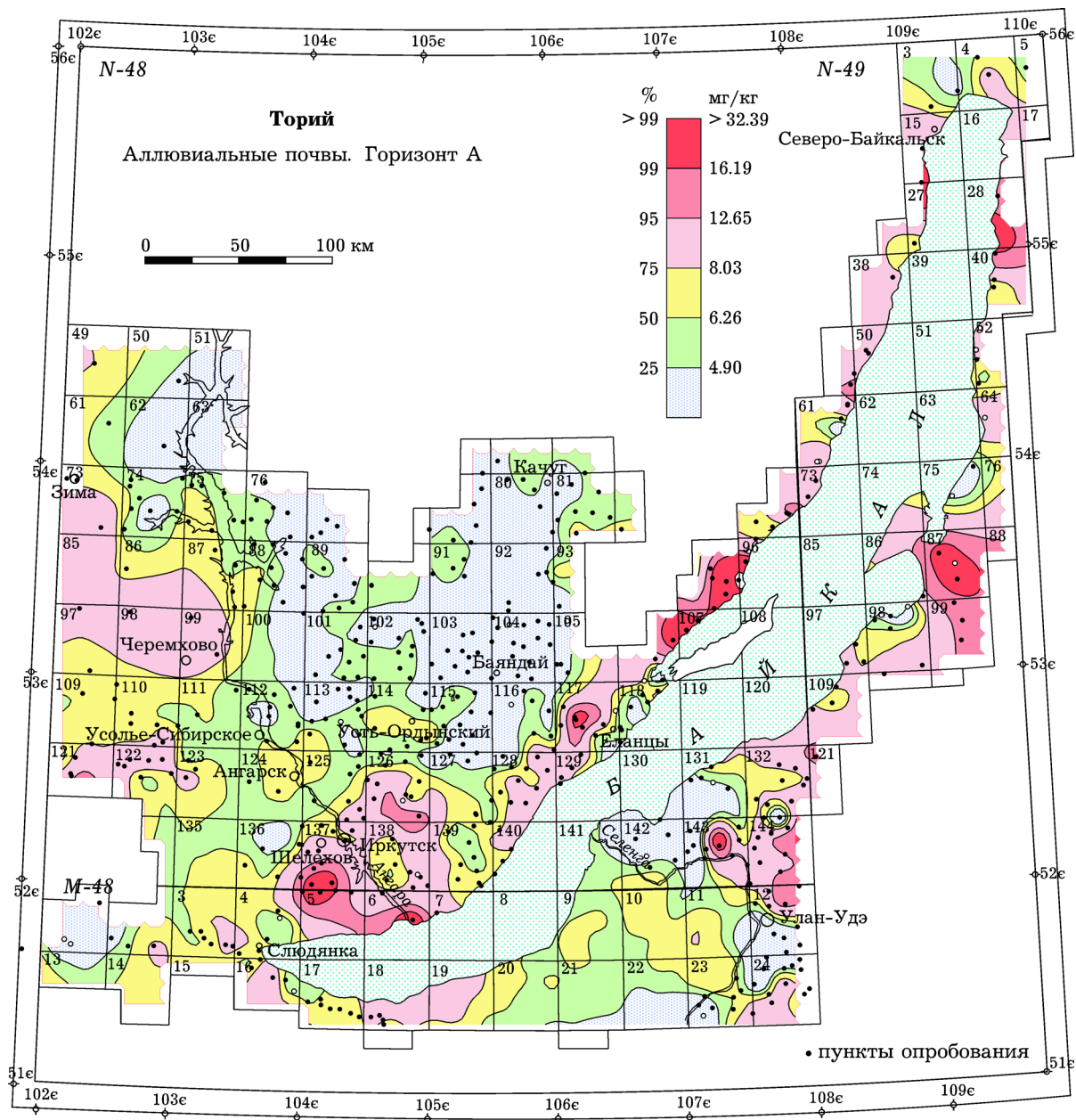


Рис. 3. Распределение концентраций тория в аллювиальных почвах (горизонт А) Прибайкалья

на, а область повышенного содержания свойственна полям развития субщелочных и щелочных гранитоидных пород различных комплексов и возрастов по периметру оз. Байкал. Также выделяется несколько аномальных участков в юго-восточной части региона, образующих вытянутые зоны, соответствующие известным металлогеническим поясам.

Распределение аномальных полей тория во всех типах почв и в донных отложениях аналогично таковому для урана и тория в коренных породах (рис. 1–5). Максимальные со-

держания тория образуют поля вдоль северо-западного и юго-восточного обрамления оз. Байкал, а также в районах истока р. Ангары, г. Зима и пос. Усть-Ордынск. Лишь в районе западнее г. Улан-Удэ в участках с максимальным содержанием урана в аллювиальных почвах отсутствуют повышенные концентрации тория. Причина этого не установлена. Содержание тория в почвах в пределах восточной прибрежной полосы оз. Байкал (данные 2007–2008 гг.) составляет 3,80–25,14 (среднее 20,62), а Th/U отношение при этом составляет 2,73.

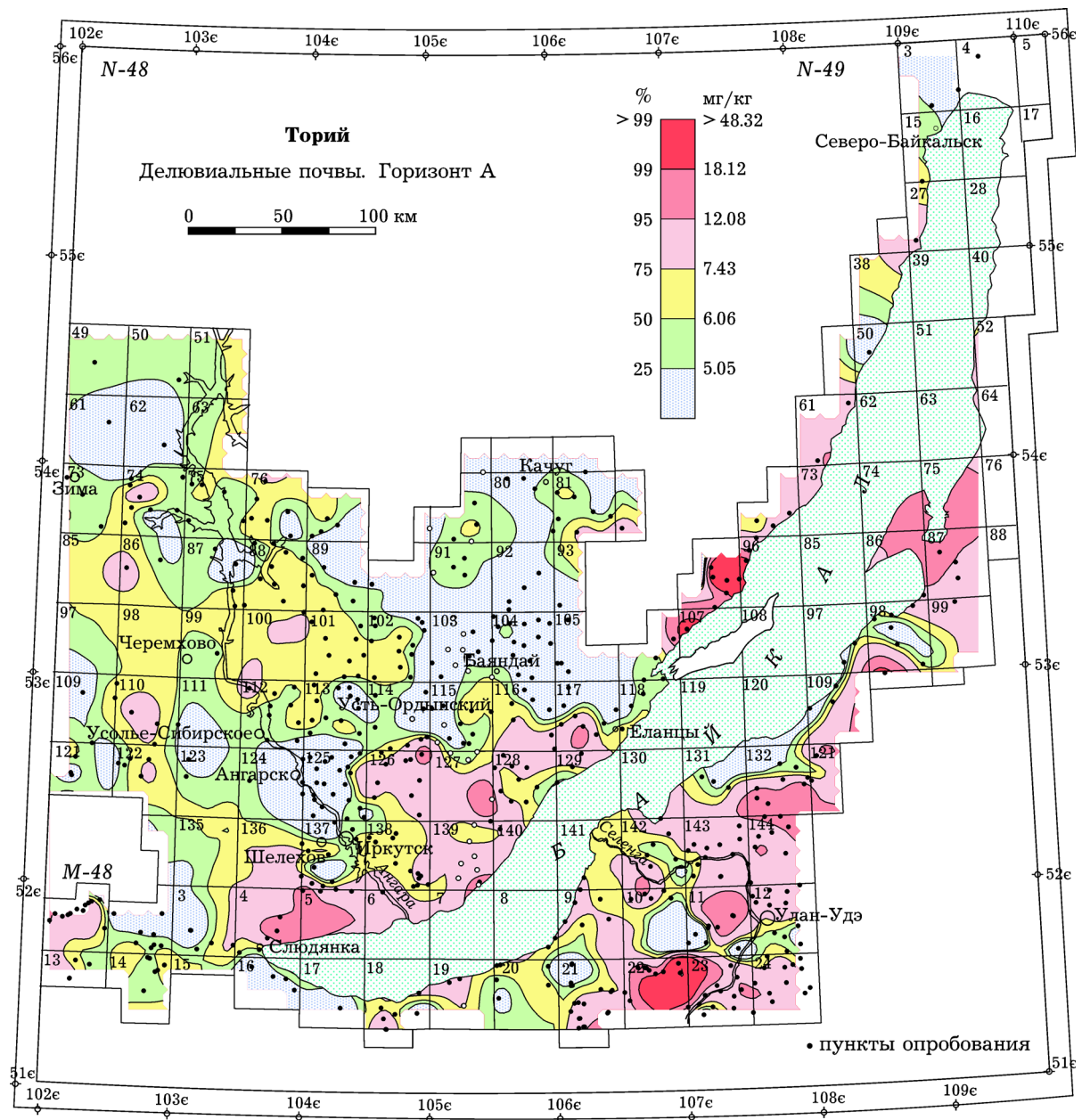


Рис. 4. Распределение концентраций тория в делювиальных почвах (горизонт А) Прибайкалья

Близкое значение Th/U отношения, как отмечено выше, зафиксировано для Байкальского полигона в целом.

В речных водах бассейна оз. Байкал и в Прибайкалье (реки Анга, Утулик, Ангара, Холодная, Большая, Давша, Фролиха и др.) содержание тория изменяется от 0,004 до 0,02 мкг/дм<sup>3</sup> при содержании в воде оз. Байкал – 0,02 мкг/дм<sup>3</sup>. В речных (приустьевых) водах прибрежной южной и восточной полосы оз. Байкал содержание тория колеблется в пределах 0,003–0,679 мкг/дм<sup>3</sup>, а отношение

Th/U – 0,005–3,56, при этом наиболее низкое содержание тория (0,003–0,25 мкг/дм<sup>3</sup>) фиксируется в реках Кика, Шумиха, Аносовка, Выдринная и др., а наиболее высокое (0,213–0,679 мкг/дм<sup>3</sup>) – в реках западного побережья – Большая, Маритуй, Крестовка и др.

### <sup>137</sup>Цезий

Удельная активность <sup>137</sup>Cs в гумусовом горизонте почв меняется более чем на два с половиной порядка (табл. 4). Причем доля об-

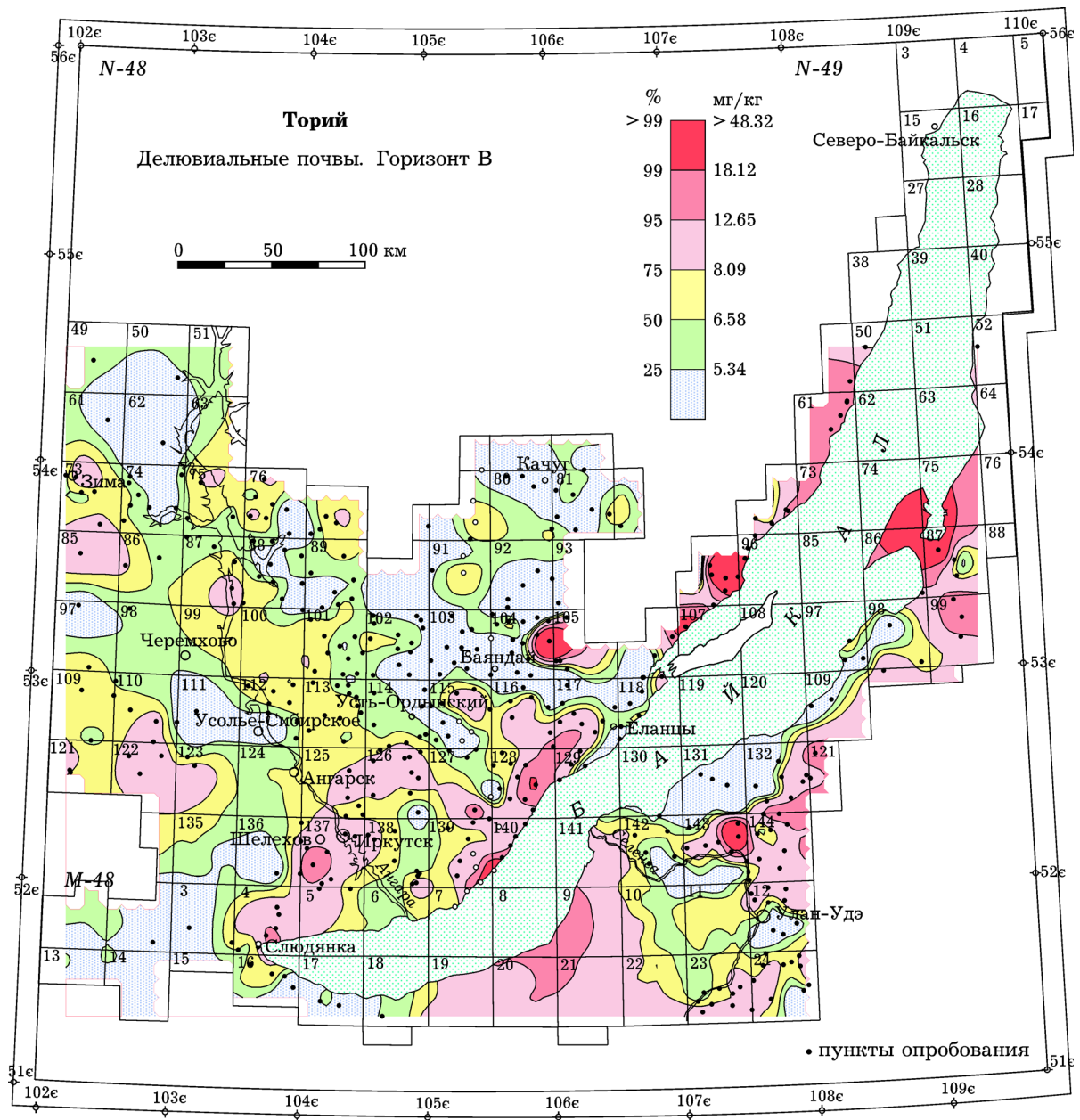


Рис. 5. Распределение концентраций тория в делювиальных почвах (горизонт В) Прибайкалья

разцов с аномальными значениями, превышающими региональный фон в 3 раза и более, составляет не менее 45 %. Их основная масса сосредоточена в полосе, протягивающейся от северной оконечности оз. Байкал вдоль Байкальского и Приморского хребтов на юго-запад до пос. Кырен и далее вдоль южного и восточного побережья Байкала (рис. 6). В северо-восточной и юго-западной частях региона также намечаются зоны проявления повышенных удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$ . Плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$

на загрязненных территориях составляет 100–200  $\text{Ки}/\text{км}^2$  [13], а содержание  $^{137}\text{Cs}$  в гумусовом горизонте А достигает в отдельных местах 426  $\text{Бк}/\text{кг}$  при геохимическом фоне 10  $\text{Бк}/\text{кг}$ . Наиболее высокие значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в делювиальных почвах обнаружены в районе г. Байкальска (351,5  $\text{Бк}/\text{кг}$ ), на северо-западном побережье оз. Байкал (222,3–333,3  $\text{Бк}/\text{кг}$ ) и в северной части площади полигона (425,9  $\text{Бк}/\text{кг}$ ). Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  до 407,4  $\text{Бк}/\text{кг}$  отмечены также в аллювиальных почвах района



Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Байкальского региона, Бк/кг

Параметр	Почвы делювиальные			Почвы аллювиальные
	А	В	А/В	
Число проанализированных образцов	547	442	–	523
Образцы с удельными активностями меньше предела обнаружения (3,7 Бк/кг)	7 (1,3 %)	14 (3 %)	2	11 (2 %)
Образцы с удельными активностями больше 37 Бк/кг	168 (31 %)	13 (2,9 %)	0,08	72 (14 %)
Образцы с удельными активностями больше 74 Бк/кг	76 (14 %)	5 (1,1 %)	0,06	20 (4 %)
Максимальная удельная активность	426	155	0,36	407
Среднее значение	35	7	0,19	18
Медиана	9	4	0,46	11
Мода	9	4	0,46	11
Региональный фон	11	3,7	0,33	3,48
Стандартное отклонение	9,43	3,35	–	8,09
Коэффициент вариации	138,6	204,8	–	166,4

г. Северо-Байкальска и несколько южнее. Значения  $^{137}\text{Cs}$ , многократно превышающие региональный фон, установлены по профилю г. Железногорск – г. Рудногорск [2]. Следует также отметить, что удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в активных речных осадках достигают 98,8 Бк/кг, а в донных осадках оз. Байкал – 33,6–66,6 Бк/кг [9]. Источником радиоактивных загрязнений стали ядерные испытания на Семипалатинском полигоне [3]. Кроме того, имеются местные объекты повышенной радиационной опасности, к которым относятся скважина подземного ядерного взрыва в мирных целях (в Осинском районе Усть-Ордынского Бурятского автономного округа) под кодовым названием “Рифт-3”, Ангарский электролизно-химический комбинат, пункт захоронения радиоактивных отходов Иркутского специализированного комбината “Радон”.

Изучение почвенных разрезов в районе скважины “Рифт-3” и в окрестностях ближайших к ней населенных пунктов показало, что плотность загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  достигает 62–105 мКи/км<sup>2</sup>, что в 1,25–2,1 раза превышает уровень глобального фона (50 мКи/км<sup>2</sup>) [13].

Таким образом, отмеченные выше данные подтверждают положение о том, что

загрязнение в регионе  $^{137}\text{Cs}$  происходило преимущественно путем трансрегионального переноса. Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в гумусовом горизонте почв меняются значительно (см. табл. 4). Основная часть (порядка 70 %) радиоактивного цезия сосредоточена в гумусовом горизонте. Коэффициент миграции (отношение содержаний-активностей в горизонте В к таковому в горизонте А) при этом меняется от 0,03 до 1,0 и в среднем может быть оценен величиной порядка 0,2. Зона наибольшего сосредоточения пунктов опробования с повышенными удельными активностями  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в целом тяготеет к полосе с высоким годовым количеством осадков, обрамляющей Байкал с запада и юго-востока [2, 3].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты рекогносцировочной оценки особенностей распределения Th и  $^{137}\text{Cs}$  в окружающей среде Прибайкалья свидетельствуют о широкой распространенности и высокой изменчивости содержания этих элементов, которое зачастую многократно превышает региональный фон. Показан двойственный генезис аномальных полей: природный и техногенный. Техногенная

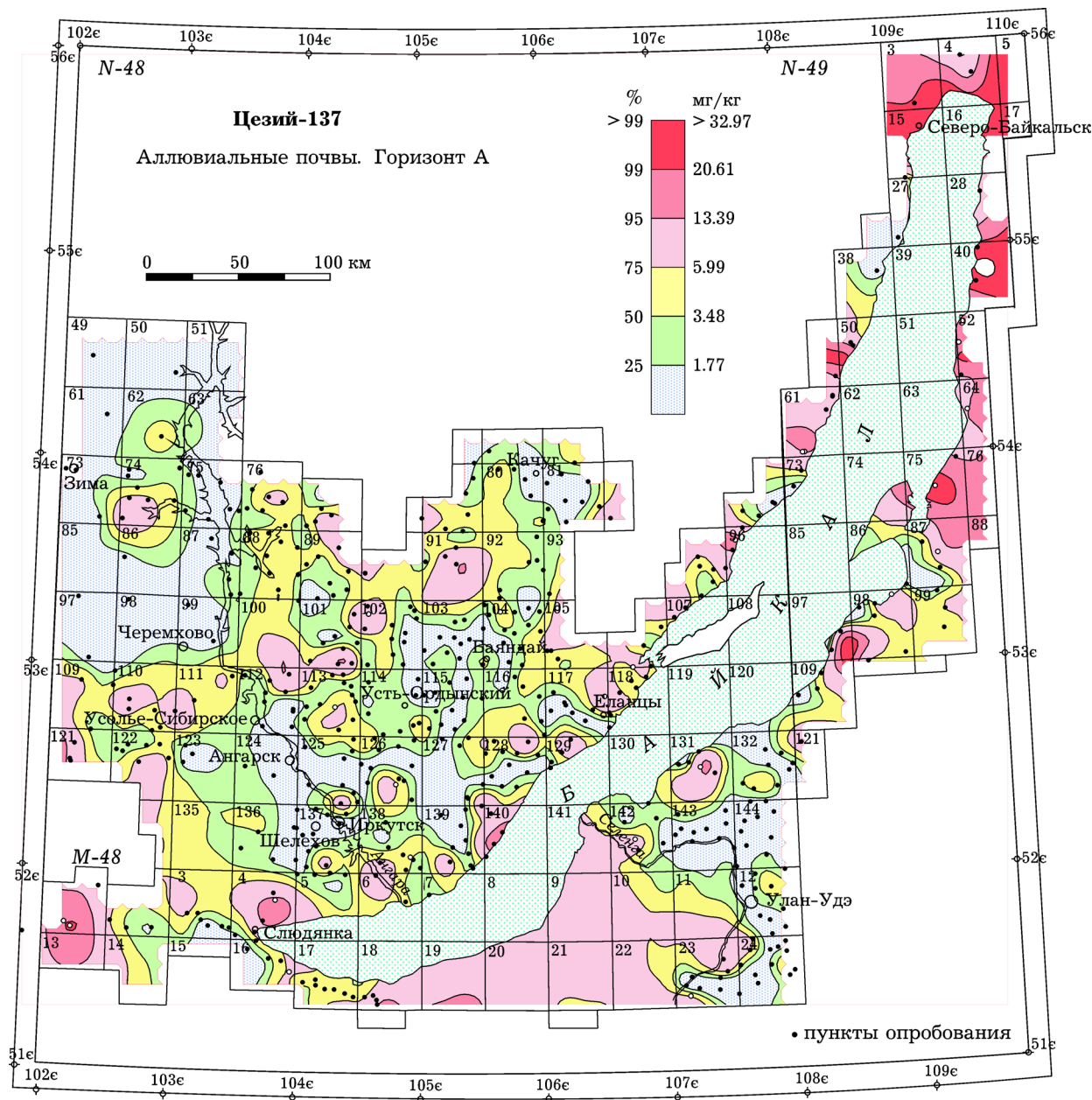


Рис. 6. Распределение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в почвах склоновых отложений (горизонт А) Прибайкалья

природа аномалий обусловлена деятельностью химических комбинатов, сжиганием углей Черемховского и Азейского угольных бассейнов ТЭЦ и различного рода котельными, а также трансрегиональным переносом выбросов радионуклидов при ядерных испытаниях. Существенное значение имеет перераспределение химических элементов в различных горизонтах почв и донных отложений и миграция их, как правило, в растворенной форме в природных водах с накоп-

лением в конечном бассейне стока – оз. Байкал. Несколько пониженные значения Th/U отношения в почвах Байкальского региона (2–3) по сравнению со средним для земной коры (3–5) свидетельствуют о нарушении природного равновесия в регионе. Рассматриваемых данных, полученных в результате мелкокомасштабной геохимической съемки, естественно, недостаточно для корректной оценки содержания природных и техногенных радионуклидов и дозовых нагрузок. Тем не менее про-

веденные исследования показали, что в Прибайкалье обнаружены многочисленные участки радиоактивного загрязнения со значительными превышениями глобального и регионального фонов и предельно допустимых концентраций, что требует постановки детальных исследований в таких местах.

Работа поддержана проектом РФФИ № 08-07-98003-р\_Сибирь\_а.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болтнева Л. И., Израэль Ю. К., Ионов В. А., Назаров И. М. Глобальное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\text{Sr}^{90}$  и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. 1977. Т. 42, № 5-6. С. 355-360.
2. Медведев В. И., Китаев Н. А., Мясников А. А., Кузьмин М. И., Коваль П. В., Фалилеев А. Н. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Прибайкалья // Докл. АН СССР. 1996. Т. 349, № 1. С. 93-96.
3. Медведев В. И., Коршунов Л. Г., Черняго Б. П. Радиационное воздействие Семипалатинского ядерного полигона на Южную Сибирь (опыт многолетних исследований по Восточной и Средней Сибири и сопоставление результатов с материалами по Западной Сибири) // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12, № 6. С. 1055-1071.
4. Коваль П. В., Кузьмин М. И. Многоцелевое геохимическое картирование масштаба 1 : 1 000 000 (МГХК 1000) – основа фундаментальных и прикладных региональных геохимических работ (Байкальский геоэкологический полигон) // IV Объединенный Международный симпозиум по проблемам прикладной геохимии, посвящ. памяти акад. Л. В. Таусона: тезисы. Иркутск: Изд-во ЛИСНА, 1994. Т. 2. С. 117-118.
5. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 275 с.
6. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. Рассмотрение геохимической летописи, запечатленной в осадочных породах. М.: Мир, 1988. 384 с.
7. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1974. 231 с.
8. Савенко В. С. Химический состав твердого материкового стока // Геохимия. 2007. № 8. С. 889-897.
9. Баранов В. И., Титаева Н. А. Радиогеология. М.: Изд-во МГУ, 1973. 242 с.
10. Рихванов Л. П., Язиков Е. Г., Сухих Ю. И. и др. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. Томск, 2006. 215 с.
11. Росляков Н. А., Ковалев В. П., Сухоруков Ф. В. и др. Экогеохимия Западной Сибири. Тяжелые металлы и радионуклиды. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 248 с.
12. Гребенщикова В. И., Китаев Н. А., Лустенберг Э. Е. и др. Распределение радиоактивных элементов в окружающей среде Прибайкалья (Сообщение 1: Уран) // Сиб. экол. журн. 2009. Т. 16, № 1. С. 17-28.
13. Мясников А. А., Медведев В. И., Богданов В. А. Ландшафтно-геохимические исследования при МГХК-1000 в Байкальском регионе // Прикладная геохимия. М.: ИМГРЭ, 2004. Т. 5. С. 290-304.

## Distribution of Radioactive Elements in the Environment in Pribaikalia (Communication 2 . Th and $^{137}\text{Cs}$ )

V. I. GREBENSHCHIKOVA, N. A. KITAEV, E. E. LUSTENBERG, V. I. MEDVEDEV\*,  
I. S. LOMONOSOV, A. N. KARCHEVSKY\*\*

*A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
664033, Irkutsk, Favorsky str., 1a  
E-mail: vgreb@igc.irk.ru*

*\*STE "Sosnovgeos"  
664039, Irkutsk, Gogol str., 53*

*\*\*Administration of the Irkutsk Region  
664001, Irkutsk, Lenin str., 1a  
E-mail: ssngeos@irk.ru*

Results of the reconnaissance exploration of the abundance and distribution of radioactive chemical elements (Th,  $^{137}\text{Cs}$ ) in various environmental components (ledge rocks, soil, bottom sediments, surface water) of Pribaikalia are presented. Wide occurrence and high variability of the concentrations of these elements in the environment, often several times higher than the regional background values, were demonstrated. The dual genesis of anomalous fields was established: natural and technogenic.

**Key words:** radioactive elements, environment, soil, water, bottom sediments, ledge rocks, natural and technogenic sources.