

**СОВРЕМЕННАЯ РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

Б.П. Черняго, А.И. Непомнящих, В.И. Медведев*

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

** Научно-техническое предприятие «Сосновгеос», 664039, Иркутск, ул. Гоголя, 53, Россия*

На основании результатов многолетних целевых радиоэкологических исследований проведена оценка основных радиационных факторов природного и техногенного происхождения в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории как участка всемирного наследия. Выделены площади, неблагоприятные по уровню проявления различных радиационных параметров, определяющих современную радиационную обстановку. Наличие таких участков необходимо учитывать при разработке и реализации планов природопользования на оз. Байкал, в том числе развития экологического туризма.

Радиационная обстановка, естественные радионуклиды, искусственные радионуклиды, рациональное природопользование.

**CURRENT RADIATION ENVIRONMENT IN THE CENTRAL ECOLOGIC ZONE
OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY**

B.P. Chernyago, A.I. Nepomnyashchikh, and V.I. Medvedev

The main natural and human-induced radiation factors were assessed on the basis of long-term targeted radioecological studies in the Central Ecologic Zone of the Baikal Natural Territory as a world heritage site. We identified areas with a problematic level of different radiation parameters determining the current radiation environment. Such areas should be taken into account in the development and implementation of nature management plans in the Baikal region, including ecotourism.

Radiation environment, natural radionuclides, artificial radionuclides, conservation

ВВЕДЕНИЕ

Во исполнение решения Комитета всемирного наследия ЮНЕСКО, согласно которому оз. Байкал как природный объект было включено в Список всемирного наследия, в 1999 г. был принят федеральный закон «Об охране озера Байкал» (№ 94-ФЗ от 01.05.1999 г.). Важным этапом реализации требований ЮНЕСКО было согласование и утверждение в 2006 г. описания границ Байкальской природной территории (БПТ) и ее экологических зон (распоряжение правительства РФ № 1205-р от 29.08.2006 г.). Границы Центральной экологической зоны (ЦЭЗ) в основном совпадают с границами участка всемирного природного наследия [Государственный..., 2009] (рис. 1).

Являясь участком всемирного наследия, оз. Байкал с его побережьем представляет большой интерес как объект национального и международного туризма. Чтобы поддержать этот интерес и привлечь российские и зарубежные инвестиции, принято постановление Правительства РФ № 68 от 03.02.2007 г. о создании на западном и восточном берегах Байкала особых экономических зон (ОЭЗ) туристско-рекреационного типа.

Для успешного развития туристической отрасли на Байкале имеются разнообразные природно-ландшафтные и курортно-климатические условия, что обусловлено прежде всего геологическими особенностями Прибайкалья. Однако необходимо понимать, что это разнообразие характерно и для радиационной обстановки, которая имеет как природное, так и техногенное происхождение. Наличие участков с повышенным радиационным фоном может быть, с одной стороны, привлекательной характеристикой, например, для экстремального и экологического туризма, создания бальнеологических (например радо-

Рис. 1. Населенные пункты, перспективные территории для туристических баз и особые экономические зоны (ОЭЗ) в ЦЭЗ Байкальской природной территории.

1 — населенные пункты (постоянного проживания); 2 — места перспективного размещения постоянных, сезонных или временных туристических баз или других жилых объектов; 3 — особые экономические зоны туристско-рекреационного типа в ЦЭЗ БПТ.



новых) лечебниц и курортов, но, с другой стороны, и неблагоприятной для долговременного проживания местных жителей и приезжих. Поэтому при составлении перспективных планов использования природных ресурсов оз. Байкал необходимо учитывать все особенности современной радиационной обстановки.

В настоящей публикации сделана попытка анализа и интерпретации результатов исследований различных организаций, проведенных в рамках целевых программ Сибирского отделения Российской академии наук, Министерства природных ресурсов России, правительства Иркутской области и местных районных муниципалитетов в течение последних двух десятилетий на Байкальской территории. Эти исследования показали, что ЦЭЗ представляет собой участок БПТ с контрастной и поэтому напряженной радиационной обстановкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе радиационной обстановки в ЦЭЗ БПТ были использованы результаты массовых прямых измерений значений радиационного поля, полученные при поисках радиоактивного сырья, которые на территории Байкальского региона ведутся в течение более 60 лет, материалы многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:1 000 000 (МГХК-1000) [Коваль и др., 1993], охватывающего площадь Байкальского геоэкологического полигона (более 110 тыс. км²), и материалы целевых радиоэкологических исследований масштаба 1:200 000—1:500 000, охватывающих территории Иркутского, Слюдянского, Ольхонского районов и Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области, а также отдельных районов Республики Бурятия. В период с 2000 г. по настоящее время площадь целевых радиоэкологических исследований была расширена на всю территорию ЦЭЗ БПТ, а также значительные части ее буферной зоны и зоны атмосферного влияния.

Целевые комплексные радиоэкологические исследования выполнялись в соответствии с методическими требованиями федеральной целевой программы «Радон», научной программы «Семипалатинский полигон—Алтай» и других ведомственных программ и проектов. При проведении исследований в каждом пункте наблюдения проводилось измерение мощности дозы гамма-излучения и сопряженное опробование нескольких компонентов окружающей среды: коренных пород, почв, донных отложений, воды из подземных и поверхностных водотоков, растительности в природных ландшафтах Прибайкалья.

Для оценки радоновой опасности изучались, как правило, почвы и грунты в окрестностях и на территории населенных пунктов в основном сельского типа, а также проводились измерения потока радона из почвы и содержания изотопов радона в воздухе жилых и общественных зданий [Черняго и др., 2008]. Дополнительно на территории природных ландшафтов и в окрестностях поселков Прибайкалья выполнено свыше 600 пунктов измерений объемной активности изотопов радона в почвенном воздухе, обследовано на радон около 300 жилых домов и общественных зданий в 25 населенных пунктах, расположенных в ЦЭЗ БПТ.

Основными объектами изучения техногенного радиоактивного загрязнения являлась ненарушенная (целинная) почва естественных ландшафтов, обычно на полянах или в редколесье, на пологих склонах и возвышенностях предгорий, реже почва пастбищ и сенокосов, т. е. там, где поверхностная миграция радионуклидов за счет вымывания либо привноса с атмосферной и паводковой водой отсутствует или минимальна [Сухоруков, 1996]. Отбор образцов почвы для оценки техногенного радиоактивного загрязнения осуществлялся послойно, через каждые 5 см, на глубину до 40 см и более, включая гори-

зонты А₀, А, В и С. Активность изучаемых радионуклидов суммировалась по всем измеренным слоям, либо оценивалась только для верхнего слоя почвы, чтобы учесть происхождение загрязнения и вклад радионуклидов в эффективную дозу.

Центральная экологическая зона БПТ без акватории оз. Байкал имеет площадь примерно 57.7 тыс. км² [Карта..., 2006]. В настоящей работе проанализированы данные из 1100 пунктов комплексного наблюдения (опробования) на территории ЦЭЗ. Такое количество пунктов соответствует плотности опробования масштаба 1:500 000.

Все пробы почв, коренных пород и донных отложений прошли количественный гамма-спектрометрический анализ на естественные радионуклиды урана-238 (по радио-226), тория-232, калия-40 (²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K) и искусственные радионуклиды цезия-137 (¹³⁷Cs) в аттестованных лабораториях ГП «Сосновгеология» (пробы МГХК-1000) и Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН (пробы целевых радиоэкологических исследований), имеющих статус базовой лаборатории программы «Семипалатинский полигон—Алтай». Часть проб почв была проанализирована в Институте геохимии СО РАН и в Иркутском спецкомбинате радиационной безопасности «Радон». Количественный анализ почвенных проб на содержание искусственных радионуклидов стронция-90 и плутония-239,240 (⁹⁰Sr и ^{239,240}Pu) выполнен в Аналитическом центре Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) и в Испытательном лабораторном центре ГСЭН Красноярского края.

С целью проверки и обеспечения достоверности результатов количественных анализов регулярно проводились межлабораторные сличительные и контрольные измерения. Внешний контроль выполнялся в лабораториях НПО «Тайфун», Висконсинского университета США и Казахстанского ядерного центра.

Всего для почвы с территории ЦЭЗ БПТ анализ содержания природных и искусственных радионуклидов выполнен по радио-226, торию-232, калию-40 и цезию-137 — около 10 тысяч проб (от 4 до 10 проб на один пункт наблюдения), по стронцию-90 — более 100 проб, по плутонию — 34 пробы.

Все данные по измерениям активности цезия-137 и стронция-90 в почве, полученные при исследованиях с 1994 по 2005 г. и показанные в настоящей публикации, были пересчитаны с учетом радиоактивного распада по состоянию на 2010 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Радиационная обстановка в ЦЭЗ БПТ отличается разнообразием, что объясняется геоморфологическими и радиогеохимическими особенностями территории. Условно ее можно охарактеризовать по источникам и путям поступления радионуклидов в окружающую среду и разделить на естественную и искусственную составляющие.

Для оценки современной радиационной обстановки в ЦЭЗ целесообразно будет использовать в качестве основного критерия среднегодовую эффективную дозу местного (взрослого) жителя, с учетом всех источников радиации, имеющих место в настоящее время в среде обитания человека и природной окружающей среде Прибайкалья. Выделяются следующие основные параметры, определяющие радиационную обстановку в ЦЭЗ БПТ в современных условиях и перечисленные в табл. 1, вклады которых в годовую эффективную дозу облучения от всех источников радиации (конечно, без учета профессиональных доз и доз от медицинских радиационных процедур) для населения на исследуемой территории будут рассмотрены далее. Параметры 1, 2, 3, 6 и 7 из табл. 1 определяют внешнее облучение человека, особенно при пребывании на открытой местности, а параметры 4, 5 и 8, а также в некоторой степени 2 и 3, определяют внутреннее облучение при вдыхании воздуха, при приеме пищи и воды. Вклад в суммарную эффективную дозу от других параметров радиационных полей и радионуклидов будет незначительным.

Чтобы провести анализ пространственного распределения вышеуказанных параметров и оценку суммарной эффективной дозы по территории ЦЭЗ и выявить аномальные участки, необходимо определить фоновые региональные уровни. Региональный фон рассчитывается либо из кларков в компонентах окружающей среды — для естественных радионуклидов [Петрова, Левицкий, 1984], либо из уровня глобальных выпадений — для искусственных радионуклидов [Непомнящих и др., 1999; Черняго, Непомнящих, 2008] (см. табл. 1).

В общем случае под радиационной аномалией необходимо принять достоверное, т.е. статистически значимое, превышение значений по одному или нескольким параметрам, характеризующих радиационную обстановку, среднего регионального (фонового) уровня этого параметра. При нормальном распределении значений интересующего параметра на определенной территории — аномальным будет являться участок территории с трех- и более кратным превышением дисперсии функции распределения от среднего регионального значения или с двух- или трехкратным уровнем превышения среднего значения этого параметра. Аномалией можно считать превышение санитарно-гигиенического норматива,

Таблица 1. Основные первичные параметры, определяющие радиационную обстановку, и их фоновые значения в Прибайкалье

Наименование параметра	Региональный фон параметра*	Контрольный уровень, определяющий «аномальность»
Параметры, интегрально характеризующие как естественный, так и техногенно измененный радиационный фон территории (внешнее облучение)		
1. Мощность эффективной дозы внешнего гамма-излучения (МД)	0.10—0.15 мкЗв/ч	0.40 мкЗв/ч
Параметры, определяющие естественный (природный) радиационный фон и радоновую опасность территории		
2. Эффективная удельная активность горных коренных пород и почв ($A_{эфф}$)	85 Бк/кг	370 Бк/кг [СП 2.6.1.2523-09]
3. Удельная активность урана в почвах (A_U)	12.0 Бк/кг	40 Бк/кг
4. Удельная активность урана, радия и/или радона в источниках водоснабжения (A_{aU} , A_{bRa} , A_{bRn})	0.01 (по U, Ra) и 1.5 (по Rn) Бк/л	0.1 (по U, Ra) и 60 (по Rn) Бк/л [СП 2.6.1.2523-09]
5. Объемная активность изотопов радона в почвенном воздухе (OA_{Rn} и OA_{Tn})	3.0 (по радону-222) и 10 кБк/м ³ (по радону-220)	10 (по радону-222) и 50 кБк/м ³ (по радону-220) [СП-98]
Параметры, определяющие облучение от техногенного радиоактивного «загрязнения» территории		
6. Плотность выпадения цезия-137 в почвах (C_{Cs}) с учетом распада на 2010 год и других искусственных радионуклидов (C_{Sr} , C_{Pu}) или их удельные активности (A , Бк/кг)	1.5 кБк/м ² (средний уровень «глобального» фона)	2.2 кБк/м ² [Непомнящих и др., 1999; Черняго, Непомнящих, 2008]
7. Плотность выпадения естественных радионуклидов (урана, радия, полония, свинца, тория и калия) в почвах, снеге (C_U , C_{Ra} , C_{Po} , C_{Pb} , C_{Th} и C_K) или их удельные активности в верхнем слое почвы, в растительности (A , Бк/кг)	0.2 кБк/м ² (по U и Th в верхнем дерновом слое почвы)	0.5 кБк/м ² (по U и Th)
8. Содержания (удельная активность) радионуклидов в местных продуктах питания (молоко, картофель)**	[Радиационно-гигиенический паспорт..., 2007]	СанПиН 2.3.2.1078-01

* Т.н. «региональный» фон конкретного параметра определен как медиана или среднее (арифметическое или геометрическое) значение этого параметра, полученное исполнителями в результате многолетних целевых исследований в Байкальском регионе.

** Исследования содержания радионуклидов в продуктах питания в рамках этой работы не проводились. Данные для оценки вклада в суммарную дозу взяты из радиационно-гигиенического паспорта Иркутской области [Радиационно-гигиенический паспорт..., 2007].

если он определен. Для выделения аномальности по эффективной удельной активности пород, по объемной активности радона в почве, по мощности дозы гамма-излучения использованы радиационно-гигиенические уровни [СП 2.6.1.2523-09; СП-98].

Говоря об аномальных по отдельным или совокупным параметрам радиационной обстановки участках территории, необходимо понимать наличие неблагоприятных и опасных для здоровья условий, скорее всего, только при длительном пребывании на них. Маловероятно, например, что экспозиция высокими активностями радона в воздухе помещений, так же как и использование строительных материалов с повышенными содержаниями радионуклидов, представляет немедленную (мгновенную) угрозу жизни и здоровью для местного населения или туристов, но тем не менее было бы неразумно затягивать вмешательство или корректирующие действия после их обнаружения. Неблагоприятные условия необходимо учитывать и снижать их опасное воздействие при проектировании и строительстве новых объектов, благоустройстве имеющихся зданий и сооружений в населенных пунктах и при планировании развития территории.

Рассмотрим по порядку, в соответствии с табл. 1, пространственное распределение указанных параметров на территории ЦЭЗ.

МОЩНОСТЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Естественный радиационный фон гамма-излучения на открытой местности обычно на 30—40 % обусловлен радиацией космического происхождения и на 60—70 % формируется благодаря присут-

твию в окружающей природной среде естественных радионуклидов, а также искусственных гамма-излучающих радионуклидов, попавших в окружающую среду в результате техногенного загрязнения. Мощность дозы гамма-излучения (МД) на открытой местности может быть представлена несколькими слагаемыми

$$МД = МД_{\text{косм}} + МД_{\text{ЕРН}} + МД_{\text{РЗ}}, \quad (1)$$

где $МД_{\text{косм}}$ — «космическая» составляющая мощности дозы гамма-излучения, $МД_{\text{ЕРН}}$ — составляющая мощности дозы от природного радиационного фона (естественные радионуклиды) «земного» происхождения, $МД_{\text{РЗ}}$ — мощность дозы гамма-излучения от загрязнения окружающей среды в результате техногенного воздействия.

Абсолютная высота поверхности оз. Байкал находится около 450 м над уровнем океана. Составляющая мощности дозы гамма-излучения от космического излучения на этой высоте местности ($МД_{\text{косм}}$) равна примерно 0.03—0.04 мкЗв/ч. Разности высот на территории ЦЭЗ обычно не превышают 1000 м, поэтому при незначительном изменении мощности дозы от космического излучения в этом интервале высот [Козлов, 1991], среднегодовую космическую составляющую гамма-излучения можно считать практически постоянной для всей территории ЦЭЗ БПТ.

Территории, сопряженные с таежными и горно-таежными ландшафтами Байкальской природной территории, по величине мощности дозы природного гамма-излучения относятся к зонам умеренной (0.07—0.10 мкЗв/ч) и повышенной (0.10—0.14 мкЗв/ч) природной радиации [Высокоостровская и др., 1996]. Повышенные значения дозы объясняются широким развитием осадочных и кислых магматических формаций с высоким содержанием естественных радионуклидов, распространением дерновых и дерново-подзолистых почв.

Региональным фоновым значением мощности дозы гамма-излучения с учетом естественных колебаний во времени (прежде всего, от космической составляющей) в Прибайкалье можно считать 0.10—0.15 мкЗв/ч [Черняго, Непомнящих, 2008]. Тогда превышение значения мощности дозы гамма-излучения 0.4 мкЗв/ч будет считаться аномальным (хотя ни в национальных санитарных правилах, ни в международных рекомендациях по радиационной защите нет ограничений на природное гамма-излучение на открытой местности).

Мощность дозы для источника естественных гамма-излучающих радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) на земной поверхности, равномерно распределенного по всему полупространству, представляется в виде

$$МД_{\text{ЕРН}} = (k_{\text{Ra}} \times A_{\text{Ra}} + k_{\text{Th}} \times A_{\text{Th}} + k_{\text{K}} \times A_{\text{K}}) \times 10^{-3}, \text{ мкЗв/ч.} \quad (2)$$

Здесь $МД_{\text{ЕРН}}$ — мощность (эффективной) дозы гамма-излучения на высоте 1 м от поверхности земли (мкЗв/ч); A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} — удельные активности радионуклидов урана (по радию-226), тория-232, калия-40 соответственно (Бк/кг); k_{Ra} , k_{Th} , k_{K} — коэффициенты пересчета в дозу ((нЗв/ч)/(Бк/кг)); множитель 10^{-3} используется для перехода от нЗв к мкЗв.

Если также учесть повсеместное (глобальное) распространение искусственных гамма-излучающих радионуклидов цезия-137, в том числе и в почвах Байкальской природной территории, то к суммарной дозе гамма-излучения от естественных радионуклидов нужно добавить слагаемое $k_{\text{Cs}} \times A_{\text{Cs}}$:

$$МД_{\text{РЗ}} = k_{\text{Cs}} \times A_{\text{Cs}} \times 10^{-3}, \text{ мкЗв/ч.} \quad (3)$$

Расчет показывает, что доза внешнего излучения на высоте 1 м от поверхности земли на 80 % определяется гамма-излучающими (естественными и искусственными) радионуклидами, находящимися в верхнем 3—5-сантиметровом слое почвы [United..., 2000; Clouvas et al., 2000]. Коэффициенты зависят от энергетического спектра излучения радионуклидов, химического состава почвы, ее плотности, влажности и др. [Natural..., 1996]. В табл. 2 приведены наиболее типичные значения коэффициентов пересчета из удельных активностей радионуклидов в дозу, а также значения этих коэффициентов из работы [Кузнецов, 1996], полученные для почв Прибайкалья при сопоставлении данных лабораторных измерений проб верхнего 5 см слоя почвы с данными прямых измерений на открытой местности с помощью полевого гамма-спектрометра, так же как в [Quindos et al., 2004].

Мощность эффективной дозы гамма-излучения определяется в основном естественными радионуклидами. Даже в «цезиевых» аномалиях вклад в суммарную дозу гамма-излучения от искусственных радионуклидов не превышает 10 %.

Следует подчеркнуть, что повышенные уровни мощности дозы внешнего гамма-излучения (более 0.6 мкЗв/ч) регистрируются на отдельных участках, прилегающих к побережью оз. Байкал. Это объясняется повышенным содержанием естественных радионуклидов в породах (в основном гранитах, кварцитах) и почвах, которые наследуют эти радиогеохимические особенности от нижележащих коренных пород. Такие участки располагаются в основном на скальных обнажениях, в относительно труднодоступных, малонаселенных и малопосещаемых горных районах.

Таблица 2. Коэффициенты пересчета активностей радионуклидов в мощность дозы гамма-излучения на высоте 1 м от поверхности для «стандартной» и реальной почвы

Коэффициент (нЗв/ч)/(Бк/кг)	k_{Ra}	k_{Th}	k_K	k_{Cs}
Почвы Прибайкалья [Кузнецов, 1996]	0.57 ± 0.03	0.85 ± 0.03	0.044 ± 0.002	0.053 ± 0.003
«Стандартная» почва [Clouvas et al., 2000]	0.52	0.71	0.047	—
Измерения для почв разных регионов « <i>In situ — in lab</i> » [Quindos et al., 2004]	0.46	0.58	0.043	—

Площади и объекты, в разной степени опасные по величине МД гамма-излучения (рис. 2), пользуются на территории ЦЭЗ умеренным развитием. Они расположены в пределах горного обрамления оз. Байкал и Восточно-Саянской горной системы и приурочены к выходам пород, специализированных на уран (потенциально ураноносных) гранитовой, гнейсовой и вулканогенно-терригенной формаций архей-раннепротерозойского и рифейского возрастов [Петрова, Левицкий, 1984].

Потенциально опасные площади, представленные выходами высокорadioактивных горных пород с величиной МД гамма-излучения от 0.4 до 0.6 мкЗв/ч, а также ареалами сближенных радиоактивных аномалий с величиной МД гамма-излучения более 0.6 мкЗв/ч, слагают около 8 % территории ЦЭЗ в виде цепочки разобщенных участков размером от 50 до 1800 км², расположенных вдоль западного и северо-восточного побережий оз. Байкал и в пределах Восточного Саяна, к югу и западу от Иркутска (см. рис. 2).

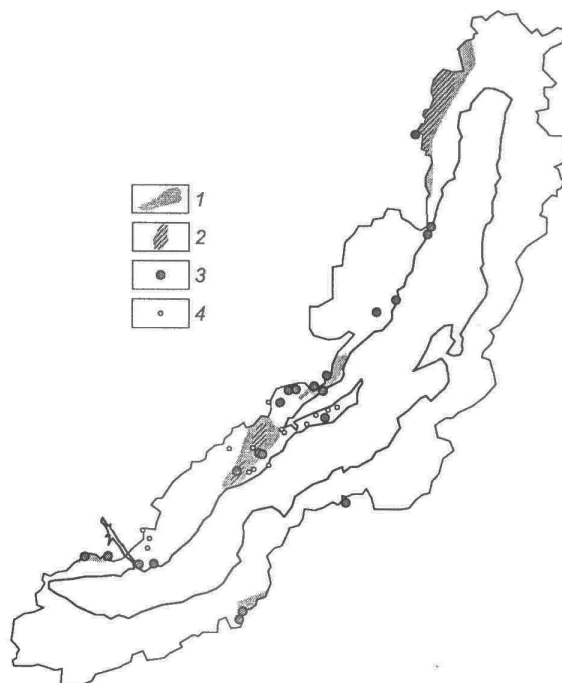
Опасным уровнем радиационного поля гамма-излучения характеризуются локальные участки, охваченные гидротермально-метасоматическими процессами. Они представлены небольшими по площади (10—20 км²) выходами пород с МД гамма-излучения на поверхности 0.6—0.8 мкЗв/ч и локальными аномалиями радиоактивности с величиной МД гамма-излучения от 0.6 до 2.0 мкЗв/ч.

К числу особо опасных объектов относятся расположенные на территории зоны отдельные рудопроявления урана и многочисленные радиоактивные аномалии с величиной МД гамма-излучения свыше 1.0 (до 33) мкЗв/ч. Все эти объекты имеют локальный характер, их размеры не превышают 1 км², но при разведке они вскрывались открытыми горными выработками, что привело к локальному радиоактивному загрязнению местности. В совокупности локальные участки и аномалии радиоактивности, относящиеся к числу объектов опасных и особо опасных по величине МД гамма-излучения, контролируются ураноносными структурами и комплексами Западного Забайкалья, Прибайкалья и Восточного Саяна и слагают менее 1 % площади ЦЭЗ (см. рис. 2).

Эффективная удельная активность коренных пород. Концентрации естественных радионуклидов (урана, радия, тория, калия) в компонентах природной среды Байкальского региона определяются составом геологических формаций, слагающих его территорию. Центральная и Буферная экологические зоны БПТ, представляющие собой в совокупности западный фланг Забайкальской уранорудной провинции, сложены преимущественно древними метаморфическими породами и гранитоидами, среди которых широким развитием пользуются разновидности с высоким содержанием естественных радионуклидов [Петрова, Левицкий, 1984]. Экологическая зона атмосферного влияния относится к

Рис. 2. Участки ЦЭЗ Байкальской природной территории с повышенными уровнями МД гамма-излучения и удельной эффективной активности пород.

1 — участки с МД гамма-излучения более 0.4 мкЗв/ч и удельной эффективной активностью более 370 Бк/кг; 2 — участки с МД гамма-излучения более 0.6 мкЗв/ч и удельной эффективной активностью более 740 Бк/кг; 3 — рудопроявления с МД более 1.0 мкЗв/ч и эффективной активностью более 1200 Бк/кг; 4 — повышенные концентрации радона-222 (> 60 Бк/л), урана-238 и/или радия-226 (> 0.1 Бк/л) в воде (родники, колодцы, скважины).



территории Сибирской платформы и сложена осадочными кембрийскими карбонатно-терригенными и юрскими угленосными отложениями с преимущественно фоновыми содержаниями радионуклидов, где участки с напряженным уровнем радиационного фона имеют место, но в значительно меньшей мере, чем на территории ЦЭЗ.

Наиболее высокие значения мощности дозы гамма-излучения в ЦЭЗ наблюдаются на горных обнажениях и выходах коренных пород с повышенными содержаниями естественных радионуклидов на дневную поверхность. Замечено, что в Прибайкалье коренные породы с повышенными содержаниями естественных радионуклидов и покрывающие их почвы, наследующие основные, в том числе радиоактивные свойства, главным образом приурочены к гранитоидным интрузиям раннепротерозойского возраста и активным тектоническим разломам, а также к долинам рек, осадочный материал которых выносятся из областей этих радиоактивных интрузий.

Коренные породы архейского возраста, юрские и четвертичные отложения характеризуются обычно низкими содержаниями естественных радионуклидов. В болотистых низинах, широких поймах рек, где коренные породы экранированы с большим слоем неогеновых, четвертичных или современных отложений, радиационный фон обычно пониженный по сравнению со средним региональным фоном.

Величина удельной эффективной активности ($A_{эфф}$, Бк/кг) представляет собой интегральную характеристику радиоактивности коренных пород и рассчитывается по следующей формуле [СП 2.6.1.2523-09]:

$$A_{эфф} = A_U + 1.3 \times A_{Тн} + 0.09 \times A_K, \text{ Бк/кг.} \quad (4)$$

По сути, эта формула аналогична формуле (2), особенно в части происхождения источника повышенного уровня гамма-излучения на аномальных участках территории, где слой почвы незначительный или отсутствует (например, скальные обнажения). Поэтому участки с повышенным уровнем гамма-излучения в основном совпадают с участками, которые отличаются аномальными содержаниями естественных радионуклидов в коренных породах.

Площади, аномальные по величине $A_{эфф}$, пользуются на территории региона относительно небольшим развитием, они сосредоточены в пределах хребтов Восточный Саян и Хамар-Дабан (нижнее течение Селенги) примерно в тех же районах, что и площади с высоким значением МД гамма-излучения. Размер отдельных площадей, неблагоприятных по удельной эффективной активности горных пород, колеблется от 1 до 3 000 км²; все они имеют четко выраженное зональное строение, как и любые геохимические аномалии.

К *потенциально опасным* отнесены площади с осредненным значением удельной эффективной активности $A_{эфф}$ от 370 до 740 Бк/кг. Фактически в пределах этих площадей имеет место перемежаемость мелких участков с величиной $A_{эфф}$ от 200 до 370 и от 370 до 1200 Бк/кг, каждый из которых не может быть отражен в масштабе карты, а в целом эти площади ближе всего отвечают критериям «зоны контроля», т. е. потенциально опасной. В совокупности они составляют около 8 % территории ЦЭЗ. Вне территории ЦЭЗ БПТ это отдельные площади в горах Восточных Саян размером от 50—100 до 500 км² и довольно крупная площадь в 3 тыс. км² к югу от Улан-Удэ, представляющая собой западный фланг Забайкальского уранорудного пояса.

Участки с *опасным уровнем* осредненного поля $A_{эфф}$ от 740 до 1200 Бк/кг имеют локальный характер и расположены внутри площадей потенциально опасного радиационного состояния. Их размеры колеблются от 50 до 200 км², а суммарная площадь составляет примерно 0.7 % территории Центральной экологической зоны. Отдельные пункты с величиной $A_{эфф}$ до 1200 Бк/кг расположены и вне этих участков.

Суммарная площадь территории с потенциально опасным и опасным уровнем удельной эффективной активности пород составляет 5.1 тыс. км² или 8.8 % от ЦЭЗ.

Удельная активность урана в почвах. Этот критерий радиационной опасности нами также использован при оценке радиационной обстановки на территории Байкальского региона и его Центральной экологической зоны, хотя содержание урана в почвах действующими санитарными правилами не нормируется. Повышенные содержания урана в почве представляют, скорее всего, химическую, нежели радиационную опасность [Радиация..., 1990].

Участки с потенциально опасным (3.5—5.0 мг/кг или 44—62 Бк/кг (по радио-226)) и опасным (5—10 мг/кг или 62—124 Бк/кг) содержанием урана в гумусовом слое почв составляют соответственно 3.3 и 2.9 % от территории ЦЭЗ. В большинстве своем эти участки приурочены к выходам высокорadioактивных пород горного обрамления оз. Байкал и располагаются в средней части ЦЭЗ на западном и юго-западном побережье озера.

В целом эти природные радиогеохимические аномалии менее выразительные, чем территории с высоким содержанием урана в коренных породах или неблагоприятные по уровню МД гамма-излучения и $A_{эфф}$, занимают меньшие площади и фиксируют лишь часть выходов высокорadioактивных пород.

Использование данных по содержанию урана в почвах лишь незначительно уточняет общую картину радиозоологического состояния региона, но указывает на наличие еще одного из важных аспектов радиационной опасности, учет которого необходим.

Удельная активность урана, радия и радона в воде. Дополнительным параметром к оценке радиационной обстановки являются имеющиеся данные о (повышенных) содержаниях урана, радия или радона в обследованных источниках питьевого и хозяйственного водоснабжения — скважинах, колодцах, а также в естественных родниках (нормы содержания отдельных радионуклидов в питьевой воде определены в санитарно-гигиенических правилах [СП 2.6.1.2523-09; МУ 2.6.1.1981-05]).

Вода из акватории оз. Байкал характеризуется очень малой минерализацией — 0.1 г/л [Государственный..., 2009], вследствие чего и малой концентрацией (активностью) урана-238 — 0.4 мкг/л (или 0.005 Бк/л) [Бухаров, 2001]. Однако вода, поступающая в Байкал из отдельных притоков, и, тем более вода из подземных источников, может характеризоваться повышенным содержанием естественных радионуклидов [Radionuclide..., 2007].

Как правило, повышенные содержания естественных радионуклидов (уран, радий, радон) в воде наблюдаются вблизи естественных радиационных аномалий в породах и почвах. В основном аномальные водные источники отмечаются на юго-западном побережье оз. Байкал (см. рис. 2). Но нет гарантий, что и в других частях ЦЭЗ могут быть выявлены высокие содержания естественных радионуклидов в подземных водозаборах, колодцах.

Поэтому при использовании воды, особенно подземной (артезианской), обязательно, хотя бы в начале эксплуатации водоисточника, проведение анализа воды на содержание радионуклидов, в том числе радона.

Объемная активность изотопов радона в почвенном воздухе. Участки местности с повышенным уровнем природного гамма-излучения, как правило, являются радоноопасными. Наличие выходов на поверхность коренных пород с повышенными содержаниями радионуклидов урана-238 и тория-232 и приуроченных к ним тектонических разломов, обусловленных рифтовой природой оз. Байкал, приводит к значительному выделению в атмосферу радона-222 и радона-220 (торона).

Как известно, доля изотопов радона и их дочерних продуктов распада в общей дозе радиоактивного облучения, получаемой населением Прибайкалья, составляет от 50 до 90 % [Черняго, Непомнящих, 2001]. Радоновая опасность обусловлена поступлением радона из грунта или из используемых подземных вод в жилые помещения. Одноэтажные деревянные дома, распространенные в поселках сельского типа, где практически отсутствует принудительная вентиляция и защита от проникновения почвенных газов из подполий в помещения, наименее защищены от радона. Именно там могут наблюдаться высокие содержания радона.

В санитарных правилах [СП 2.6.1.2523-09] оценка опасности от радона основывается на оценке величины среднегодовой концентрации (активности) изотопов радона в воздухе жилья. Предельная среднегодовая активность дочерних продуктов радона в жилых помещениях (для населения) составляет 200 Бк/м³. Опасный уровень активности 400 Бк/м³ требует вмешательства — или снижение активности радона до приемлемого уровня инженерно-строительными методами, или переселение из неблагополучного жилья.

Из 150 населенных пунктов, находящихся в ЦЭЗ БПТ, только примерно в десяти поселках были проведены наиболее полные прямые исследования радоновой обстановки с измерениями среднегодовых активностей радона в воздухе жилых и общественных домов. Поэтому для прогнозной оценки радоновой опасности был использован массив данных наиболее широко и равномерно распределенных на исследуемой территории, а именно — объемная активность изотопов радона в почве.

Между содержанием радона и его дочерних продуктов в воздухе помещений в населенных пунктах Прибайкалья сельского типа наблюдается определенная зависимость от активности изотопов этого природного газа в почве [Черняго и др., 2008]. Учитывая эту взаимосвязь и соотношение, критерием отнесения участков территории к опасным по активности изотопов радона в почве можно принять превышение этим параметром (OA_{Rn}) значения 10 кБк/м³ в соответствии с [СП-98].

По совокупности этих критериев к категории *опасной* и *потенциально опасной* по радону относятся около 30 % территории ЦЭЗ (рис. 3). Опасные по радону участки совпадают, как правило, с особо опасными участками, выделенными по мощности дозы гамма-излучения и удельной эффективной активности пород и почв. Это те же выходы высокорadioактивных горных пород на территории Забайкалья, горного обрамления оз. Байкал и в Восточном Саяне, как правило, приуроченные к активным тектоническим разломам.

Плотность выпадения искусственных радионуклидов на территории ЦЭЗ (по цезию-137 в почвах).

Сразу необходимо оговориться, что радиоактивного загрязнения в компонентах окружающей среды на Байкальской природной территории с точки зрения санитарно-гигиенических норм нет. Речь идет

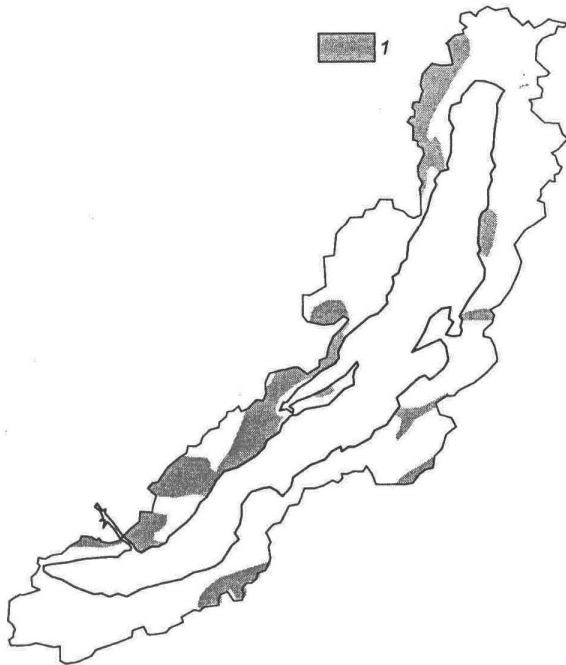


Рис. 3. Карта-схема распределения повышенных объемных активностей радона в почвенном воздухе по ЦЭЗ Байкальской природной территории.

1 — уровень объемной активности радона-222 в почвенном воздухе более 10 кБк/м³ и/или радона-220 более 50 кБк/м³.

о повышенных (выше регионального и/или глобального фона) содержаниях искусственных радионуклидов в почве исследуемой территории. Современный уровень содержания искусственных радионуклидов в почвах и местных продуктах питания по международным и российским нормативам (НРБ-99/2009 [СП 2.6.1.2523-09]) является безопасным для проживания и не накладывает ограничений на ведение хозяйственной деятельности.

Наличие повышенных уровней содержания искусственных радионуклидов цезия-137 и стронция-90 на территории, прилегающей к оз. Байкал, было установлено еще в 1974 г. по результатам аэрогаммасъемки всей территории Советского Союза

[Болтнева и др., 1977] и подтверждено дальнейшими исследованиями местных научно-исследовательских и геологических организаций [Медведев и др., 1996; Непомнящих и др., 1999; Черняго, Непомнящих, 2008]. Это загрязнение сформировалось вследствие трансрегионального переноса в атмосфере радиоактивных продуктов наземных и воздушных ядерных взрывов, проводившихся на испытательных полигонах бывшего Советского Союза и США (Невада) в 1949—1962 гг. По величине воздействия и радиоактивного загрязнения ядерные испытания на китайском полигоне Лоб-Нор (до 1982 г.) и Чернобыльская авария (1986 г.) оказали на территорию Прибайкалья незначительное влияние по сравнению с последствиями от советских (Семипалатинского и Северного) полигонов.

Проведенными в пределах Байкальского региона радиозоологическими исследованиями выделены два основных участка с повышенными содержаниями в почве искусственных радионуклидов: южный и северный участок ЦЭЗ Прибайкалья (рис. 4), которые обусловлены влиянием соответственно Семипалатинского и Северного полигонов бывшего Советского Союза.

Из долгоживущих искусственных радионуклидов, попавших в природную среду Прибайкалья в результате ядерных испытаний, в настоящее время наиболее просто определяются гамма-излучающие радионуклиды цезия-137 (с периодом полураспада 30 лет). Фон по цезию-137, сформированный в результате глобальных выпадений, для полосы северных широт 50—60° и, в частности, для Южной Сибири, оценивается величиной 1.48 кБк/м² (или 40 мКи/км²) по состоянию на 2010 г. [Непом-

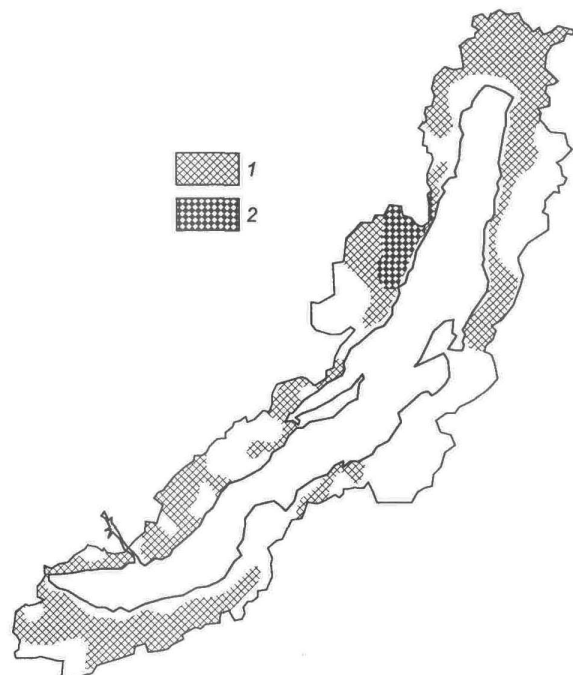


Рис. 4. Карта-схема плотности выпадения радионуклидов цезия-137 в почвах ЦЭЗ Байкальской природной территории.

1 — уровень плотности выпадения цезия-137 в почве более 2.2 кБк/м²; 2 — уровень плотности выпадения цезия-137 в почве более 5.5 кБк/м².

жания урана в верхнем слое почв (более 1.5 кБк/м²) отмечаются в окрестностях Иркутска, Ангарска и Шелехова. Эти аномалии совпадают с участками, зафиксированными по снегогеохимической съемке.

Удельная активность урана-238 (по радию-226) и тория-232 в верхнем горизонте почвы больше, чем в более глубоких слоях на 12 и 7.5 % соответственно. Такое распределение радия и тория характерно для техногенного изменения радиоактивности почв, связанного с выпадениями из атмосферы. Одновременное наличие в выпадениях этих двух радионуклидов указывает на то, что наиболее вероятными их источниками являются ТЭЦ, работающие на каменном угле, в котором одновременно присутствуют эти радионуклиды.

Расчет показывает, что дополнительные к естественному радиационному фону дозы внешнего излучения от естественных радионуклидов, присутствующих в верхних слоях почв обследуемой территории, могут составить до 0.1 мЗв/год на наиболее загрязненных участках вблизи крупных населенных пунктов ЦЭЗ (Култук, Слюдянка, Бабушкин). Для сравнения — среднегодовой региональный естественный радиационный фон внешнего гамма-излучения составляет величину около 1 мЗв.

Прогнозная среднегодовая эффективная доза. На побережье Байкала однозначно нет мест, где за относительно короткий период пребывания можно получить опасную для здоровья дозу облучения. Однако есть места, неблагоприятные по радиационной обстановке для постоянного или длительного проживания. Прогнозная оценка радиационной обстановки на исследуемой территории должна быть консервативной, т.е. для постоянного проживания.

Средняя за год эффективная доза получается суммированием вкладов по всем источникам облучения. Прогнозную среднегодовую эффективную дозу можно представить в виде суммы всех вышеуказанных параметров с соответствующими коэффициентами, определяющими их вклад в эффективную дозу при внешнем и внутреннем облучении:

$$D = D_{\text{внеш}} + D_{\text{внутр}} = 8.760 \times \text{МД} + (0.031 \times \text{ОА}_{\text{Rn}} + D_{\text{прод}}), \text{ мЗв/год}, \quad (5)$$

где слагаемое $8.760 \times \text{МД}$ (мкЗв/ч) — представляет годовую дозу внешнего облучения на открытой местности (в мЗв/год), полученную из произведения мощности дозы гамма-излучения на количество часов в году, слагаемое $0.031 \times \text{ОА}_{\text{Rn}}$ (Бк/м³) — «радоновая» доза внутреннего облучения (в мЗв/год), полученная из произведения дозового коэффициента, коэффициента равновесия, соотношения объемных активностей в доме и почве и активности изотопов радона в почве; а $D_{\text{прод}}$ (мЗв/год) — годовая доза внутреннего облучения от местных продуктов питания (в мЗв/год).

Наибольший вклад в суммарную дозу вносят дочерние продукты природного радона. На долю гамма-излучения приходится до 30 %. Доля от присутствия в окружающей среде Прибайкалья искусственных радионуклидов ни во внешнем, ни во внутреннем облучении не является значительной. Современный уровень загрязнения территории искусственными радионуклидами, так же как и содержания искусственных радионуклидов в питьевых водах и продуктах питания местного производства, существенного влияния на радиационную обстановку не оказывает [Радиационно-гигиенический паспорт..., 2007].

Распределение по территории ЦЭЗ прогнозной современной дозы, вычисленной по формуле (5), с учетом времени пребывания на местности побережья, показано на рис. 5. «Фоновая» суммарная эффективная доза для жителей населенных пунктов ЦЭЗ Байкала составит примерно 2.5 мЗв/год. Участки с наибольшей радиационной нагрузкой, со средней прогнозной дозой более 5 мЗв/год, большей частью совпадают с участками повышенной радоновой опасности.

По совокупности критериев природного и техногенного радиационного риска современная обста-



Рис. 5. Карта-схема прогнозных среднегодовых эффективных доз от природной радиации для населения в ЦЭЗ Байкальской природной территории.

1 — населенные пункты (постоянного проживания); 2 — участки территории, где прогнозные среднегодовые дозы могут превышать 5 мЗв.

новка на побережье оз. Байкал, в соответствии с национальными нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009 [СП 2.6.1.2523-09]), является безопасной для проживания и не накладывает ограничений на ведение хозяйственной деятельности, в том числе на развитие туристической отрасли, но требует привязки объектов к конкретной радиационной обстановке и при необходимости применения защитных мероприятий при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений.

Примером успешной реализации такого взвешенного подхода к реализации проектов экологического туризма являются выполненные в 2008 г. радиационно-экологические исследования территории ОЭЗ туристско-рекреационного типа в районе пос. Большое Голоустное (один из участков ОЭЗ «Ворота Байкала»). По результатам этих работ, участок территории ОЭЗ был охарактеризован содержанием в почве радионуклидов цезия-137 на уровне глобального фона, низким уровнем удельной эффективной активности грунтов и скальных пород, позволяющих их использование в строительстве без ограничений, а в пределах площади проектируемой застройки величина МЭД гамма-излучения и содержание в почвах урана соответствуют фоновым значениям, полностью удовлетворяя нормативам радиационной безопасности. В то же время было установлено, что площадь проектируемой застройки является радоноопасной, что требует на стадии проектирования проведения детальных исследований и применения, в случае необходимости, средств противорадоновой защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты целевых радиозоологических исследований, выполненных в пределах Центральной экологической зоны Байкальской природной территории, подтверждают, что эта территория характеризуется контрастной, напряженной радиационной обстановкой, обусловленной источниками природного и техногенного происхождения.

Напряженное радиационное состояние территории обусловлено, в первую очередь, распределением в природных средах естественных радионуклидов: урана, радия, радона, тория, калия. До 30 % площади Центральной экологической зоны является в различной степени неблагополучной (потенциально опасной, опасной, особо опасной) по содержаниям радона в почвенном воздухе, подземной воде.

Современный уровень плотности выпадений естественных и искусственных радионуклидов в компонентах окружающей природной среды, в частности в почве, Байкальской территории существенного влияния на радиационную обстановку не оказывает.

По совокупности критериев природного и техногенного радиационного риска современная обстановка оз. Байкал в соответствии с национальными нормами радиационной безопасности является безопасной для проживания и не накладывает ограничений на ведение хозяйственной деятельности, в том числе на развитие туристической отрасли, но требует привязки к конкретной радиационной обстановке и применения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, в случае необходимости, мер противорадоновой защиты.

ЛИТЕРАТУРА

Болтнева Л.И., Израэль Ю.А., Ионов В.А., Назаров И.М. Глобальное загрязнение ^{137}Cs и ^{90}Sr и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 5, с. 355—360.

Бухаров А.А. Байкал в цифрах (краткий справочник). Иркутск, Изд-во АО «Радиян», 2001, 72 с.

Высокоостровская Е.Б., Краснов А.И., Смыслов А.А. Карта радиационных доз естественного гамма-излучения территории России // Материалы Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск, 1996, с. 177—179.

Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2008 году». Иркутск, Сибирский филиал ФГУНПП «Росгеолфонд», 2009, 455 с.

Карта «Центральная экологическая зона Байкальской природной территории». М-б 1:200000. МПР, Иркутск, 2006.

Коваль П.В., Белоголова Г.А., Буренков Э.К., Пампура В.Д. Геохимическое картирование и мониторинг природной среды на Байкальском полигоне // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (10/11), с. 238—252.

Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М., Энергоатомиздат, 1991, 352 с.

Кузнецов А.Ф. Дифференцированная по источникам излучения оценка мощности дозы внешнего облучения на поверхности земли от ЕРН и Cs-137 // Материалы Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск, 1996, с. 455—456.

Медведев В.И., Китаев Н.А., Мясников А.А., Кузьмин М.И., Коваль П.В., Фалилеев А.Н. Распределение ^{137}Cs в почвах Прибайкалья // Докл. РАН, 1996, т. 349, № 1, с. 93—96.

Медведев В.И., Коршунов Л.Г., Черняго Б.П. Радиационное воздействие Семипалатинского ядерного полигона на Южную Сибирь. (Опыт многолетних исследований по Восточной и Средней Си-

бири и сопоставление результатов с материалами по Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал, 2005, т. 12, № 6, с. 1055—1071.

МУ 2.6.1.1981-05. Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. М., Роспотребнадзор, 2005, 43 с.

Непомнящих А.И., Черняго Б.П., Кузнецов А.Ф., Медведев В.И. Локальные выпадения на юге Иркутской области от наземных ядерных испытаний // Докл. РАН, 1999, т. 369, № 2, с. 258—260.

Петрова З.И., Левицкий В.И. Петрология и геохимия гранулитовых комплексов Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1984, 200 с.

Радиация. Дозы, эффекты, риск. Пер. с англ. М., Мир, 1990, 79 с.

Радиационно-гигиенический паспорт Иркутской области по состоянию на 2006 год. Иркутск, Территориальное управление Роспотребнадзора по Иркутской области, 2007, 8 с.

Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиозологии. Томск, ТПУ, 1997, 384 с.

Садовская О.В., Черняго Б.П., Синицкая А.В. Влияние тепловых электростанций на радиозологическую обстановку в Иркутской области // Материалы Второй научно-практической конференции «Вопросы экологической безопасности и охраны окружающей среды», Иркутск, 8—10 сентября 2009 г., Иркутск, т. 3, 2009, с. 100—103.

Синицкий В.В., Черняго Б.П., Мироненко С.Н. Создание карт радиационной обстановки города Ангарска Иркутской области // Материалы III Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 23—27 июня 2009 г. Томск, SST, 2009, с. 528—532.

СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М., Роспотребнадзор, 2009, 115 с.

СП-98. Свод правил при инженерно-строительных изысканиях. М., 1998, раздел 4, 48 с.

Сухоруков Ф.В. Проблемы ретроспективного анализа радиоактивного загрязнения юга Западной Сибири (глобальный фон, локальные выпадения) // Материалы Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 1996, с. 232—235.

Черняго Б.П., Непомнящих А.И. Оценка дозовых нагрузок на население Южного Прибайкалья с учетом природного и техногенного радиационного фона // Труды Международной конференции «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». СПб., Гидрометеиздат, 2001, т. 3, с. 116—120.

Черняго Б.П., Непомнящих А.И. О радиоактивном загрязнении территории Прибайкалья от наземных ядерных испытаний // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (2), с. 171—178.

Черняго Б.П., Непомнящих А.И., Калиновский Г.И. Соотношение изотопов радона в почвах и наземных строениях в Прибайкалье // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1285—1293.

Clouvas A., Xanthos S., Antonopoulos-Domis M., Silva J. Monte Carlo calculation of dose rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soils, Health Phys., 2000, v. 78, № 295—309.

Natural radioactivity in soil and radiation levels of RAJASTMAN // Rad. Prot. Dosimetry, 1996, v. 63, № 3, p. 33.

Quindos L.S., Fernandez P.L. et al. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils // J. Environ. Radioactiv., 2004, v. 71, № 139—144.

Radionuclide concentrations in food and the environment / Eds. M.L. Leo, M. Nolle. Poschl CRC Press. Talor&Fracis Gr., Boca Raton-London-New York, 2007, 474 p.

United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex A: dose assessment methodologies, United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, New York, 2000, 1420 p.

*Рекомендована к печати 21 октября 2011 г.
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию
19 октября 2010 г.*