УДК 543.062

Гидрохимические особенности распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в озерных геосистемах осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа

С. Г. Левина, И. Я. Попова, С. Г. Захаров, В. Н. Удачин, Д. З. Шибкова, А. В. Трапезников, В. В. Дерягин, В. Н. Трапезникова

СЕРАФИМА ГЕОРГИЕВНА ЛЕВИНА — кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой химии Челябинского государственного педагогического университета. Область научных интересов: радиоэкология, теория и практика определения микроэлементов в объектах окружающей среды.

ИРИНА ЯКОВЛЕВНА ПОПОВА — научный сотрудник отдела окружающей среды Уральского научно-практического центра радиационной медицины. Область научных интересов: аналитическая химия радионуклидов.

СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ЗАХАРОВ — кандидат географических наук, доцент кафедры географии Челябинского государственного педагогического университета. Область научных интересов: гидрохимия, лимнология.

ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ УДАЧИН — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН. Область научных интересов: геохимия окружающей среды.

ДАРЬЯ ЗАХАРОВНА ШИБКОВА — доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биологии человека и животных Челябинского государственного педагогического университета. Область научных интересов: биохимические аспекты адаптации организмов к неблагоприятным воздействиям внешней среды.

АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ ТРАПЕЗНИКОВ — доктор биологических наук, профессор, заведующий Отделом континентальной радиоэкологии и Биофизической станцией Института экологии растений и животных УрО РАН. Область научных интересов: теория и практика определения радионуклидов в объектах окружающей среды.

ВЛАДИМИР ВЛАДИСЛАВОВИЧ ДЕРЯГИН — кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой географии Челябинского государственного педагогического университета. Область научных интересов: седиментология, лимнология.

ВЕРА НИКОЛАЕВНА ТРАПЕЗНИКОВА — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Отдела континентальной радиоэкологии и Биофизической станции Института экологии растений и животных УрО РАН. Область научных интересов: радиоэкология, радиобиология.

454080 Челябинск, просп. Ленина, д. 46, Челябинский государственный педагогический университет, тел. (3512)72-09-24, факс (3512)64-77-53, E-mail serafima_levina@mail.ru

В результате взрыва в 1957 г. на ПО «Маяк» емкости с радиоактивными отходами образовался так называемый Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), захвативший территории Челябинской, Свердловской и Тюменской областей [1, 2]. Осевая часть радиоактивного следа с удельной активностью свыше $7{,}4 \cdot 10^7$ кБк/км^2 протянулась на 100—120 км в северо-восточном направлении от места взрыва. Общая площадь территории, загрязненной радионуклидами, составила около 1000 км^2.

На осевой части ВУРСа оказались 30 озер, различающихся литологическим составом котловин, морфометрическими параметрами, условиями формирования гидрохимического состава стока с водосборов и площадью водосбора. Все эти параметры в совокупности определяют условия накопления донных отложений и особенности внутреннего водообмена в озерах.

Первые научные исследования озер Урускуль и Б. Сунгуль были проведены еще в начале XX столетия. Оз. Урускуль было исследовано в экспедиции В.Н. Лебедева в 1907 г. [3], а оз. Б. Сунгуль — в экспедиции С.М. Присадского в 1913 г. [4]. Результатом первых исследований стало описание морфометрических параметров, характера побережья, термического режима и прозрачности вод, определение отдельных гидрохимических элементов. Краткие сведения по озеру Б. Игиш, включающие морфологические параметры, данные о характере и типе высшей водной растительности, прозрачности вод, основных ионов, содержатся в работе [5]. Эти сведения дополняют результаты наблюдений за радиационной обстановкой вод озер Урускуль, Б. Игиш (Каслинский район Челябинской области) и Б.Сунгуль (Каменский район

Свердловской области) и их прибрежных территорий, проведенные в 1970-х годах [6—8]. Позднее появились первые данные о динамике изменения β-активности озерных вод за период 1959—1966 гг. и сведения о сезонных изменениях удельной активности вод с учетом распределения радионуклидов по компонентам озерной геосистемы и их поведения при ледообразовании [9, 10]. В обзорных работах, посвященных радиоэкологическому состоянию озер в зоне ВУРСа [11—13], как правило, приводятся гидрохимические данные, полученные в 1960−1970-х гг. До сих пор не потеряла своего значения фундаментальная гидрохимическая сводка УралНИИВХ о распределении основных ионов и микроэлементов, содержащая результаты полевых изыскательских работ на озерах в осевой зоне ВУРСа в период 1956—1970 гг. [5].

Основными депонирующими средами для радионуклидов, главными из которых являются ^{90}Sr и ^{137}Cs, служат почвы, донные отложения и высшая растительность озер. При этом вода озер является как транспортной средой (поверхностный и внутрипочвенный сток в прибереговых экосистемах), так и субстратом, в котором протекают первые процессы трансформации форм радионуклидов.

Начальное радиоактивное загрязнение водоемов на осевой части ВУРСа было очень высоким: в октябре 1957 г. радиоактивность воды достигала $2{,}5 \cdot 10^{15}$ Бк/л в оз. Урускуль (20 км от источника эмиссии), $6{,}3 \cdot 10^{13}$ Бк/л в оз. Б. Игиш (60 км от источника эмиссии) [12]. Данные по начальной β-активности воды оз. Б. Сунгуль, расположенного в 100 км от источника эмиссии, нам не известны. По расчетной модели определена суммарная удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs — около 7 Бк/л [11]. Лишь в 1959 г. была измерена удельная активность ^{90}Sr в воде этого озера, она составила около 2 Бк/л [12]. В последующие два года после аварии наблюдалось снижение суммарной активности за счет распада короткоживущих изотопов и распределения их по компонентам озерной геосистемы (донные отложения, биота). Следует отметить также, что начальная доля выброса ^{90}Sr составляла не более 3%, а доля ^{137}Cs менее 0,5% от общего излучения радионуклидов. Удельная активность ^{90}Sr в воде оз. Урускуль в 1959 г. составляла около 1900 Бк/л [12].

В настоящее время основной вклад в радиационное загрязнение местности вносят долгоживущие изотопы ^{90}Sr и ^{137}Cs. Перераспределение радионуклидов происходит как в пространстве (система озеро—водосбор), так и по отдельным компонентам озерных геосистем за счет круговорота вода—донные отложения—биота [14—16]. Данные современных исследований позволяют предположить, что гидрохимическое распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs имеет ряд особенностей в озерных геосистемах осевой части ВУРСа [17].

В период 2001—2004 гг. нами было проведено геохимическое исследование 12 озер из трех зон осевой части ВУРСа, расположенных на различном удалении от источника эмиссии (Урускуль, ближняя зона — 20 км от точки взрыва; Б.Игиш, центральная зона — 60 км от точки взрыва; Б.Сунгуль, периферийная зона — 100−110 км от точки взрыва). В круг задач входили определение катионно-анионного состава воды, химический анализ вод в отношении биогенных веществ, микроэлементов, радионуклидов. При этом микроэлементы-халькофилы и биогенные вещества в этих озерах исследовались впервые. Известно, что аморфные гидроксиды железа в тонкодисперсном состоянии сорбируют от 30 до 45% радионуклидов [18]. Не являются исключением и микроэлементы халькофильной группы. Впервые также для этих озер был проведен анализ поровых вод на содержание основных ионов и микроэлементов.

Анализ проб выполняли методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно действующим стандартным методикам РД 52.24.-95. Используемая аппаратура и условия анализа: для определения Fe и Mn — атомно-абсорбционный спектрофотометр Perkin Elmer-3110 в пламенном варианте, регистрация спектров при длинах волн 248,3 (Fe) и 279,8 (Mn) нм, соответственно; для определения Cu, Zn, Ni, Co, Pb, Cd, Cr — атомно-абсорбционный спектрофотометр Analyst-300 с электротермическим вариантом атомизации (атомизатор HGA-800), автодозатор AS-90, пирографитовые кюветы фирмы «Perkin Elmer», регистрация спектров при длинах волн 324,8 (Cu), 213,9 (Zn), 232,0 (Ni), 240,7 (Co), 283,3 (Pb), 228,8 (Cd), 357,9 (Cr) нм; для определения K, Na, Li — атомно-абсорбционный спектрофотометр Perkin Elmer-3110 в эмиссионном режиме. Для проведения калибровки готовили растворы на основе многоэлементных растворов фирмы «Perkin Elmer». Все калибровочные растворы приводились к 1 моль/л HNO_3 (растворы разбавляли деионизированной водой, полученной на установке Millipore). Гидрохимические пробы анализировались в Южно-Уральском центре коллективного пользования по анализу минерального сырья Института минералогии УрО РАН (аттестат аккредитации РОСС.RU 0001.514536).

При определении ^{137}Cs радионуклид предварительно концентрировали радиохимическим методом на ферроцианиде никеля с последующим выделением его в виде сурьмяноиодидной соли. Бета-активность измеряли на малофоновой установке УМФ-2000. Радионуклид ^{90}Sr экстрагировали из пробы моноизометилоктиловым эфиром фосфоновой кислоты и измеряли активность экстракта (по дочернему ^{90}Y) на малофоновом радиометре УМФ-1500. Выход носителя Sr контролировался пламенно-фотометрическим методом. Погрешность определения ^{90}Sr и ^{137}Cs не превышала 20 и 15%, соответственно.

Исследуемые озера расположены в пределах геоморфологических структур Зауральского пенеплена, т.е. всхолмленных равнин Среднего Урала и западных окраин Западно-Сибирской равнины. Водосборы озер локализованы на геологическом фундаменте палеозойского возраста с выходом интрузивных пород среднекислого состава и с многочисленными дизъюнктивными (разрывными) нарушениями. Восточная часть водосборов в основном относится к биоклиматической зоне березовоколочной северной лесостепи. В районе водосборов озер Урускуль и Б. Сунгуль преобладает лес с доминированием березы. Водосбор оз. Б. Игиш расположен в зоне светлохвойной южноуральской тайги с преобладанием смешанных пород (сосна, береза). Зональные почвы — серые лесные и серые лесные осолоделые (слабой степени засоленности) с высоким содержанием Na и Cl в гумусово-аккумулятивном и иллювиальном генетических горизонтах. Локально распространены луговые почвы [5].

Климат пограничный — от умеренно-континентального до континентального, коэффициент континентальности (по Л. Горчинскому) составляет 47—48. Годовое количество осадков колеблется от 400 до 490 мм. Средняя температура июля +17 °С, средняя температура января −16 °С. Среднегодовой коэффициент увлажнения за вегетационный период 0,8 [19].

Котловины озер имеют эрозионно-тектоническое происхождение, осложненное абразионными процессами. Возраст озерных котловин составляет не менее 7—8 тыс.лет. Озера лежат в пределах гидрохимической провинции преимущественного распространения гидрокарбонатных вод смешанного катионного состава, общая минерализация 0,5—1,0 г/л.

Озера Урускуль, Б. Игиш, Б. Сунгуль относятся к бессточным водоемам с малой величиной удельного водосбора. В связи с этим резко возрастает роль местных геологических условий и ионного стока почвенных и грунтовых вод. В результате ионный состав воды в озерах Урускуль и Б. Сунгуль существенно отличается от зонального уровня: отмечены сезонные колебания минерализации воды от 3,3 до 4,3 г/л при доминирующей роли гидрокарбонатных ионов (оз. Урускуль) и преобладающее содержание хлоридов при общей минерализации 2,0—2,6 г/л (оз. Б. Сунгуль). Особенностью вод этих озер является слабощелочная реакция как в летнее, так и в зимнее время (pH > 8,7). Озеро Б. Игиш имеет воды гидрокарбонатного класса содового типа группы кальция при общей минерализации 0,28—0,33 г/л.

В оз. Урускуль зафиксировано осаждение кальция: в придонных водах концентрация Ca колеблется в пределах 14—18 мг/л, в поровых водах — в интервале 0—1 см, в донных осадках содержание Ca достигает 221 мг/л. При этом концентрация магния в воде и поровых водах практически одинакова: от 99 до 143 мг/л (вода) до 97—112 мг/л (поровые воды). Процесс осаждения солей кальция является естественным (процессы осаждения кальция в гидрокарбонатных солоноватых водах описаны в теоретических [20] и «местных» лимнохимических работах [21]). Образование собственных минеральных фаз кальция косвенно указывает на большую потенциальную сорбционную способность донных отложений таких озер по отношению к ^{90}Sr в сложившейся геохимической обстановке. Основные морфометрические параметры озер Урускуль, Б. Сунгуль и Б. Игиш приведены в табл. 1.

Результаты анализа тяжелых металлов в исследуемых озерах представлены в табл. 2. Обращают на себя внимание низкие концентрации биофильных элементов, в первую очередь марганца, что связано с активным вовлечением элементов в биохимический круговорот в летний период. Все рассматриваемые озера лежат на достаточно большом удалении от промышленных зон. Поселения на их берегах (за исключением оз. Б. Сунгуль) отсутствуют. Несколько повышенные концентрации свинца в оз. Б. Игиш объясняются близостью автомобильной трассы Тюбук—Багаряк, а в оз. Б. Сунгуль — селитебно-рекреационной зоной на побережье и деятельностью рыбохозяйственного предприятия с частым использованием моторных лодок. Повсеместно отмечается превышение рыбохозяйственных ПДК по меди (природный фон Южно-Уральского субрегиона биосферы для халькофильных и части сидерофильных элементов обусловлен естественными геохимическими аномалиями, где концентрации некоторых элементов превышают действующие ПДК в несколько раз). В воде оз. Б. Сунгуль обнаружено некоторое превышение уровня по железу. Причина довольно высоких концентраций никеля и кобальта в оз. Урускуль связана с местным геологическим строением юго-западной части водосбора, включающей в себя вулканогенные породы, обогащенные указанными элементами.

Из биогенных веществ исследовались соединения минерального азота (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-) и фосфора (общего). Измерялось их содержание в озерах в летний и зимний периоды с целью выявления активности биологического круговорота в водоемах, а также для оценки антропогенного влияния на среду данной группы соединений. На основании наших измерений в целом можно заключить, что биогенные элементы не входят в состав внешних загрязнителей, их содержание близко к природному распределению в зависимости от климатических сезонов. Вместе с тем в оз. Б. Сунгуль были зарегистрированы явно повышен-

Таблица 1

Морфометрические параметры озер Челябинской и Свердловской областей

Озеро	Площадь зеркала S, км^2	Глубина, м		Объем водной массы V, млн. м^3	Коэффициент емкости $H_{ср}/H_{макс}$	Коэффициент открытости $S/H_{макс}$
		максимальная $H_{макс}$	средняя $H_{ср}$			
Урускуль	5,0	3,8	3,0	15,0	0,8	1,6
Б. Игиш	1,6	3,3	2,6	3,6	0,82	0,6
Б. Сунгуль	10,0	6,0	3	27,0	0,5	3,3

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах озер (в мкг/л)

Озеро	$Fe_{общ}$	Mn	Cu	Zn	Ni	Co	Cd	Pb
Урускуль	93,2	6,1	11,15	6,6	16,0	10,2	0,10	0,2
Б. Игиш	23,0	7,0	5,3	9,0	0,6	< 1,0	< 0,02	5,0
Б. Сунгуль	236,0	2,0	2,2	1,1	2,7	< 1,0	< 0,02	14,0

Таблица 3

Содержание органического вещества в водах озер.

Минимальные и максимальные значения по сезонам года и глубинам

Озеро	ХПК, мгO_2/л	ПО*, мгO_2/л	Цветность, град.	Взвешенные вещества, мг/л
Урускуль	65,8—82,3	9,26—14,02	34—46	5,5—17,5
Б. Игиш	44,5—46,3	8,8—9,36	35—37	6,5—7,0
Б. Сунгуль	56,6	6,63	17—41	5,0—10,5

* Перманганатная окисляемость.

ные по сравнению с фоновыми для природных вод концентрации общего фосфора, что может быть вызвано сельскохозяйственной деятельностью в пределах активного водосбора оз. Б. Сунгуль.

Содержание органического вещества в озерах оценивалось по косвенным показателям: перманганатной и дихроматной окисляемости, цветности вод и общему содержанию взвешенных веществ (табл. 3).

В водах всех озер обнаружены существенные превышения ПДК по трудноокисляемой группе органических веществ (3—5,5 ПДК) и в целом незначительные для эвтрофных озер (богатых биогенными веществами, возможно, заросших высшей водной растительностью и водорослями) значения перманганатной окисляемости (легкоокисляемые органические вещества). Цветность воды также в среднем в 1,5 раза превышает установленные гигиенические нормативы для питьевых вод, но существенного стока с заболоченных территорий не отмечено, хотя в 2002—2003 гг. было зафиксировано подтопление берегов с участками как луговой, так и лесной растительности. Повышенные концентрации взвешенных веществ в озерах Урускуль и Б. Сунгуль вызваны открытостью данных водоемов (см. табл. 1) и, возможно, ветровым взмучиванием. Данный процесс на озерах в случае их радиоактивного загрязнения представляет серьезную опасность, так как способствует выносу слабосвязанных форм радионуклидов в водную среду из донных отложений.

Оценка содержаний радионуклидов в воде озер за период 2001—2003 гг. представлена в табл. 4, а динамика спада активности ^{90}Sr в водах озер за 46 лет — в табл. 5. Как следует из данных табл. 5, наибольшая кратность очищения наблюдается для оз. Б. Игиш, что объясняется спецификой состава донных отложений. Предварительные оценки концентраций общего углерода в составе донных отложений свидетельствуют о высоком содержании органической

Таблица 4

Содержание радионуклидов в воде озер

Озеро	Удельная активность, Бк/л	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Урускуль	112 ± 32	0,20 ± 0,05
Б. Игиш	6,5 ± 0,3	0,09 ± 0,03
Б. Сунгуль	0,3 ± 0,1	0,012 ± 0,002

Таблица 5

Содержание ^{90}Sr в воде исследуемых озер в 1957 и 2003 гг.

Озеро	Удельная активность, Бк/л		Кратность очищения
	1957	2003	
Урускуль	7570	92	82
Б. Сунгуль	31,7	0,6	53
Б. Игиш	1064	31,7	169

фракции в верхних неконсолидированных слоях. Как известно, органическая матрица донных отложений озер сорбирует до 47% запаса радионуклидов [18].

Исследование изменения содержания стронция-90 в воде озер Урускуль, Б. Сунгуль и Б. Игиш во времени с момента аварии [9] показало, что спад активности происходит по экспоненциальной зависимости (см. рисунок). Для озер Урускуль и Б. Сунгуль периоды полуочищения воды от ^{90}Sr в первые три года после загрязнения составляют в среднем (1 ± 0,4) года и (24 ± 4) года в последующем до 1999 года. Среднее значение периода полуочищения воды озер ВУРСа от ^{137}Cs в первые три года после аварии составляет 0,° года, в отдаленный период — около 10 лет [16]. По литературным данным [6, 10] и собственным результатам исследования в 2002 г. установлена динамика изменения содержания ^{90}Sr в воде озера Б. Игиш.

Для оз. Б. Игиш начальный этап характеризуется резким спадом активности с периодом полуочищения 0,6 года. Дальнейший спад активности происходит с периодом полуочищения 18 лет и обусловлен процессами перераспределения радионуклида между водой и донными отложениями (сорбция, десорбция, миграция, изменение форм), а также радиоактивным распадом ^{90}Sr (снижение активности в 2,9 раза).

Обычно рассматривают три этапа изменения радиоактивности воды с момента загрязнения[10]:

— первый этап оценивается в несколько дней, когда и происходит резкий спад радиоактивности до установления некоторого равновесия;

— второй этап продолжается около трех лет, в течение которых происходит дальнейшее уменьшение удельной радиоактивности воды в основном за счет более прочного закрепления радиоизотопов в донных отложениях;

— третий этап характеризуется наиболее медленным снижением радиоактивности, что обусловлено в основном распадом радионуклидов и динамическим

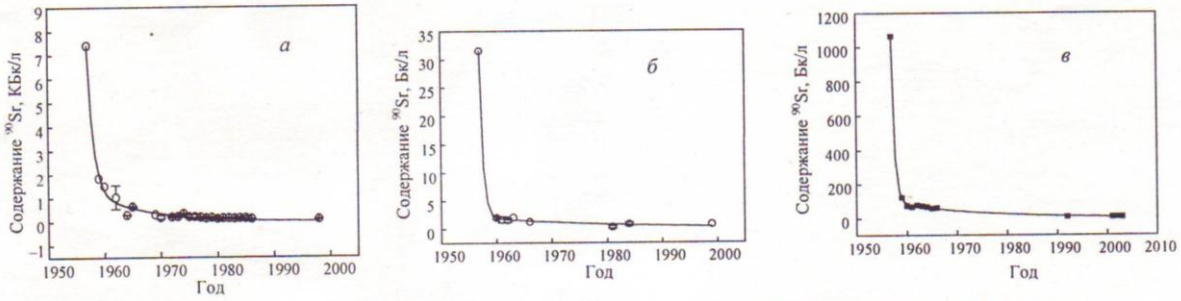

Рис. Динамика изменения содержания ^{90}Sr в воде оз. Урускуль (*а*), оз. Б. Сунгуль (*б*), оз. Б. Игиш (*в*)

равновесием между водной массой и донными отложениями.

Нами было изучено сезонное изменение содержания ^{90}Sr в воде оз. Б. Игиш. Установлено, что максимальная удельная активность проявляется в зимний период, минимальная — в весенне-летний. Так, содержание ^{90}Sr в пробе воды озера Б. Игиш, отобранной в феврале, в 1,4 раза выше, чем в пробе, отобранной в сентябре. Кроме этого, обнаружены отличия в концентрации стронция-90 в поверхностной и придонной водах. Удельная активность радионуклида в придонной воде озер Урускуль и Б. Игиш в 2,8 и 2,1 раза, соответственно, выше, чем в поверхностной воде.

Таким образом, проведенные нами исследования позволили выявить следующие особенности современного состояния озер осевой зоны ВУРСа. Анализ придонных и поровых вод в высокоминерализованных озерах свидетельствует о пересыщении поровых вод по кальцию и возможном отложении кальциевых солей, сорбирующих часть радионуклидов за счет своей большой удельной поверхности. В придонной воде, по сравнению с приповерхностной, концентрация радионуклидов возрастает как в связи с сезонными колебаниями, так и, возможно, в связи с повышением содержания гидроксидов железа и марганца в этих слоях. Спад активности радионуклидов носит экспоненциальный характер. Наблюдения последних лет свидетельствуют о прочности связи радионуклидов с матрицей донных отложений и о наличии вторичного загрязнения водной массы радионуклидами при сезонной интенсификации миграционных процессов.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-Урал 04-05-96-057.

ЛИТЕРАТУРА

1. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990, 144 с.
2. *Романов Г.Н., Спирин Д.А., Алексахин Р.М.* Природа, 1990, № 5, с. 83—88.
3. *Лебедев В.Н.* Отчет об экскурсионном исследовании Зауральских озер летом 1907 года. СПб, 1909, Изв. И.Р.Г.О., т. 45, вып. 10, 619—689 с.
4. *Присадский С.М.* Предварительный отчет по исследованию озер на восточном склоне Урала. Пг., 1914, Изв. И.Р.Г.О., т. 50, вып. 5—6, 40 с.
5. *Черняева Л.Е., Черняев А.М., Еремеева Е.М.* Гидрохимия озер (Урал и Приуралье). Л.: Гидрометеоиздат, 1977, 335 с.
6. *Ровинский Ф.Я.* Дис. ... канд. хим. наук. Москва, 1964, 162 с.
7. *Анненкова Л.А.* О содержании радиоактивных веществ в озерах и в водных организмах на территории ВУРСа. Отчет о НИР, Челябинск, ОНИС, 40 с.
8. *Мешалкина Н.Г.* Дис. ...канд. биол. наук. Москва, 1966, 163 с.
9. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 г. на ПО «Маяк». Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева, М.: ГУЛ Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ, 2001, 294 с.
10. *Коготков, А.Я., Осипов В.Г.* Вопросы радиационной безопасности, 2002, 3, с. 44—60.
11. *Трапезников А.В., Юшков П.И., Николкин В.Н. и др.* Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин, вып. 3. Заречный, 2000, с. 54—94.
12. *Крышев И.И., Романов Г.Н., Исаева Л.Н. и др.* Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин, вып. 4. Заречный, 2001, с. 107—122.
13. *Костюченко В.А., Голдырев С.Б., Попова И.Я. и др.* Вопросы радиационной безопасности, 2002, спец. выпуск, с. 39—48.
14. *Тимофеева-Ресовская Е.А.* Тр. Института экологии растений и животных. Свердловск, 1963, вып. 30, с. 3—76.
15. *Ophel I.L.* Radioecology, 1963, p.213—216.
16. *Сафронова Н.Г., Воробьева М.И.* Атомная промышленность: окружающая среда и здоровье человека, М.: Наука. 1988 с.198—204.
17. *Левина С.Г., Захаров С.Г., Дерягин В.В. и др.* Мат. XIII Межд. симп. «Международный год воды — 2003». Австрия, 29 марта—05 апреля 2003 г. М.: изд. Комитета по экологии ГД РФ, 2003, с. 116—119.
18. *Hou X.L., Fogh C.L., Kucera J. e. a.* Sci. Total Environ., 2003, v. 308, p. 97—109.
19. Природа Челябинской области. Под ред. М.А. Андреевой, Челябинск, 2000, 270 с.
20. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Мысль. 1975, 341 с.
21. *Захаров С.Г., Харитонова С.В.* Мат. XX Всерос. конф. «Строение литосферы и геодинамика», Иркутск, ИЗК СО РАН, 2003, с. 218.