

УДК 574.2:574.632

⁹⁰Sr in the Ecosystems of Salt Lakes of the Crimea

Natalya Yu. Mirzoyeva*

*A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS
2 Nakhimov, Sevastopol, 299011, Russia*

Received 14.04.2016, received in revised form 29.05.2016, accepted 18.10.2016

The peculiarities of the concentration and redistribution of the artificial radionuclide ⁹⁰Sr in ecosystem components in the salt lakes of the Crimea (Kyzyl-Yar, Donuzlav, Dzharylhatch, Bakalskoye, Kiyatskoe, Kirleutskoe, Chokrak, Aktashskoye, Koyashskoye) were identified and described for the first time. The radiochemical, chemical analytical research methods and statistical methods of data processing were applied. It was found that the highest ⁹⁰Sr concentration in water of the Kiyatskoe (350.5 Bq/m³) and Kirleutskoe (121.3 Bq/m³) lakes were caused by discharge of the Dnieper river waters from the North-Crimean channel into these lakes. It was identified that the redistribution of ⁹⁰Sr between the water, bottom sediments and aquatic plants of the salt lakes of the Crimea is negligible. The absorbed doses (3.2×10⁻⁶ Gy/yr) of the ⁹⁰Sr in the hydrophytes in the salt lakes of Crimea did not have any significant radiation effects on aquatic plants for the period after the Chernobyl NPP accident.

Keywords: Crimea, salt lakes, the Black Sea, the Chernobyl NPP accident, ⁹⁰Sr, dose.

DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-4-467-483.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: natmirz@mail.ru

^{90}Sr в экосистемах соленых озер Крыма**Н.Ю. Мирзоева***Институт морских биологических исследований
имени А.О. Ковалевского РАН
Россия, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2*

В соленых озерах Крыма (Кызыл-Яр, Донузлав, Джарылгач, Бакальское, Киятское, Кирлеутское, Чокракское, Акташское, Кояшское) впервые определены концентрации и описаны особенности перераспределения искусственного послеаварийного радионуклида ^{90}Sr по компонентам экосистем. Применены радиохимические, химико-аналитические методы исследования, методы математической статистики. Выявлено, что наибольшие концентрации ^{90}Sr в воде озер Киятского ($350,5 \text{ Бк/м}^3$) и Кирлеутского ($121,3 \text{ Бк/м}^3$) были обусловлены сбросом в них днепровской воды из Северо-Крымского канала. Установлено, что перераспределение ^{90}Sr по цепи «вода – донные отложения – водные растения» в соленых озерах Крыма является незначительным. Количество послеаварийного ^{90}Sr , попавшего в соленые озера Крыма, сформировало в гидрофитах исследуемых водоемов поглощенные дозы ($3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гр/год}$), не оказавшие заметного радиационного воздействия на водные растения в период после аварии на ЧАЭС.

Ключевые слова: Крым, соленые озера, Черное море, авария на Чернобыльской АЭС, ^{90}Sr , дозы.

Введение

Поступление искусственных радионуклидов в окружающую среду обусловлено как открытыми испытаниями ядерного оружия, так и авариями на предприятиях с технологиями, использующими ядерную энергию. 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) произошла авария, явившаяся крупнейшей ядерной катастрофой XX в. (Асмолов и др., 1988; Израэль, 1998; Апплби и др., 1999). В течение 10 дней, пока шли выбросы в атмосферу, в окружающую среду поступило $1,9 \text{ ЭБк}$ радиоактивного материала, представленного продуктами деления и трансурановыми продуктами активации, что составляло 3–4 % активности, содержащейся в активной зоне реактора. Помимо инертных газов в атмосферу было выброшено 20 % йода, находившегося в

активной зоне ($670 \text{ ПБк } ^{131}\text{I}$), 10 % от общего количества цезия ($19 \text{ ПБк } ^{134}\text{Cs}$ и $37 \text{ ПБк } ^{137}\text{Cs}$), $8 \text{ ПБк } ^{90}\text{Sr}$ и $0,1 \text{ ПБк}$ изотопов плутония (Израэль и др., 1987; Ильин, Павловский, 1988; Егоров и др., 1993; Поликарпов и др., 2008). Поступление ^{90}Sr в окружающую среду в результате Чернобыльской аварии было в 80–200 раз меньше, чем вследствие испытаний ядерного оружия в открытых средах, но превышало на 2–4 порядка высвобождение этого радионуклида в результате других ядерных инцидентов (Polikarov, 1966; Нелепо, 1970; Joseph et al., 1971; Gudiksen et al., 1989; Gudiksen et al., 1991; Fukushima Daiichi accident, 2015). Радиоактивное загрязнение водных экосистем, расположенных как вблизи места взрыва, так и значительно удаленных от него, связано с выбросом в атмосферу и ветровым переносом радиоактивных про-

дуктов и аэрозольных частиц. В мае 1986 г. на поверхность территории Крыма и Черного моря выпало 0,3 ПБк ^{90}Sr (Livingston et al., 1986; Егоров и др., 1993; Vakulovsky et al., 1994; Поликарпов и др., 2008). В послеварийные годы радиоэкологическая ситуация в Крыму определялась вторичным радионуклидным загрязнением, прежде всего ^{90}Sr , со стоками рек, преимущественно Днепра, хроническим радиоактивным загрязнением в основном за счет водопользования из Северо-Крымского канала (СКК) (Егоров и др., 1993; Поликарпов и др., 2008). Особенностью Чернобыльской аварии было то, что радиоактивное загрязнение окружающей среды произошло на масштабе времени значительно меньшем, чем характерное время протекания биогеохимических процессов. Поэтому поставарийный ^{90}Sr в качестве радиотрассера может характеризовать интенсивность гидрологических и биогеохимических процессов, происходящих в водных экосистемах.

В Крыму расположено свыше 50 соленых озер континентального и морского типа (Балушкина и др., 2009). Соленые озера Крыма содержат практически неисчерпаемые запасы солей натрия, магния, брома и других химических элементов (Понизовский, 1965), являясь потенциальной мощной сырьевой базой для крупной химической промышленности России. Они представляют собой уникальные экосистемы со своеобразным гидрохимическим режимом и структурой сообществ живых организмов (Бульон и др., 1989; Шадрин и др., 2004; Балушкина и др., 2009). Многие соленые озера Крыма используются в рекреационных и хозяйственных целях (Первольф, 1953; Понизовский, 1965). Высокая соленость воды в этих озерах поддерживается главным образом за счет ее интенсивного испарения, особенно в летний период. Это может приво-

дить к концентрированию многих химических элементов, в том числе и радиоактивных (Бульон и др., 1989).

Изучение распределения ^{90}Sr в компонентах экосистем соленых озер Крыма впервые за весь послеварийный период начато в 2013 г. Цель работы заключалась в проведении сравнительного исследования соленых озер Крыма в отношении миграции и перераспределения поставарийного ^{90}Sr по компонентам изучаемых водных экосистем, определении роли живого и косного вещества в переносе и элиминации радионуклида в соленых водоемах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- Определить концентрации и особенности перераспределения ^{90}Sr по компонентам экосистем соленых озер Крыма: Кызыл-Яр, Донузлав, Джарылгач, Бакальское, Киятское, Кирлеутское, Чокракское, Акташское, Кояшское.

- Провести сравнительный анализ содержания ^{90}Sr в воде, гидробионтах, донных отложениях соленых озер Крыма и близких к их местоположению черноморских экосистем. Выявить возможные источники поступления ^{90}Sr в экосистемы соленых озер Крыма.

- Рассчитать дозовые нагрузки, полученные водными растениями соленых озер Крыма от ионизирующего излучения ^{90}Sr и его дочернего продукта ^{90}Y в период после аварии на ЧАЭС.

Материалы и методы

Радиоэкологическое изучение соленых озер Крыма проводилось в период после аварии на ЧАЭС в 2013–2014 гг. Материал для исследования был отобран сотрудниками отдела радиационной и химической биологии (ОРХБ) Института морских биологических исследований РАН во время экспеди-

ций на соленые озера Крыма Евпаторийской (оз. Кызыл-Яр), Тарханкутской (оз. Донузлав, Джарылгач, Бакальское), Перекопской (оз. Киятское, Кирлеутское), Керченской (оз. Акташское, Чокракское, Кояшское) групп (рис. 1, табл. 1). Каждая группа озер различается по происхождению, водному балансу, концентрации и химическому составу солевых рассолов (Понизовский, 1965).

Озеро Кызыл-Яр входит в Евпаторийскую группу соленых озер Крыма, является озером лиманного типа, отделено от моря узкой песчаной пересыпью. Площадь зеркальной поверхности озера составляет 8 км². Наибольшая глубина – 3,7 м. Площадь водосбора 328 км², впадающая река – Тобечокрак. В прошлом гиперсоленое озеро в настоящее время является пресным из-за просачивания пресной воды из водохранилища (Shadrin et al., 2012). Озеро было лечебным, в настоящее время используется для рекреации (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014).

Озера Донузлав, Джарылгач и Бакальское относятся к озерам Тарханкутской груп-

пы. Озеро Донузлав – крупнейшее в группе и самое глубокое озеро в Крыму. Его площадь 48,2 км². Длина береговой линии 104 км. Наибольшая глубина 27 м, площадь водосбора 1288 км². Впадающие реки – Старый Донузлав, Донузлав, Бурнук, Чернушка. В настоящее время оз. Донузлав является по статусу техногенным заливом (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014). Озеро Джарылгач – второе по размерам после оз. Донузлав. Площадь его водного зеркала 8,3 км². Происхождение – лиманное. Группа гидрологического режима – бессточное (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014). Площадь водного зеркала Бакальского озера 7,1 км². Площадь водосбора – 257 км². Длина 4 км. Средняя ширина и глубина составляет 1,7 км и 0,4 м соответственно. Происхождение – лиманное. Группа гидрологического режима – бессточное. Основной источник питания – поверхностные, морские и подземные воды, в него впадают речки Романовка и Джугеньская-Ахтанская. Озеро лечебное и используется для рекреации (Понизовский, 1965; Shadrin, Anufriieva, 2013; Озера Крыма, 2014).



Рис. 1. Расположение станций отбора проб из соленых озер Крыма и близлежащих районов Черного моря

Таблица 1. Координаты и характеристика районов отбора проб

Место отбора проб и материал исследования	Дата отбора проб	Координаты места отбора проб	Соленость, ‰	pH
Озеро Кызыл-Яр (вода)	13.05.2014	45°03.558' N 33°37.460' E	1,90	7,11
Озеро Донузлав (вода; <i>Potamogeton</i> sp.)	19.02.2013	45°26.296' N 33°11.773' E	16,19	8,70
Озеро Джарылгач (донные отложения)	10.08.2014	45°34.011' N 32°51.438' E	163,00	7,77
Озеро Бакальское (вода, донные отложения, <i>Cladophora</i> sp.)	19.02.2013	45°44.004' N 33°10.246' E	17,94	9,45
	13.05.2014	н.д.	н.д.	
	08.08.2014	н.д.	н.д.	
Озеро Киятское (вода, донные отложения, <i>Cladophora</i> sp.; <i>Potamogeton</i> sp.)	19.02.2013	46°0.084' N 33°56.707' E	82,55	7,75
	13.05.2014	46°0.084' N 33°56.707' E	106,60	
	18.11.2014	45°59.361' N 35°57.365' E	180,00	
Озеро Кирлеутское (вода, донные отложения)	19.02.2013	45°57.550' N 34°01.321' E	190,40	7,62
	13.05.2014	45°56.572' N 34°01.828' E	184,00	
	18.11.2014	45°55.368' N 34°02.385' E	271,00	
Озеро Чокракское (донные отложения)	07.08.2014	45°27.480' N 36°18.278' E	370,00	6,71
Озеро Акташское, станции 1, 2 (донные отложения)	07.08.2014	45°20.441' N 35°47.461' E	83,00	8,47
	07.08.2014	45°25.300' N 35°50.468' E	55,00	8,67
Озеро Кояшское (донные отложения)	08.08.2014	45°03.381' N 36°10.146' E	283,00	6,97
Черное море у оз. Бакальское (вода)	19.02.2013	45°47.241' N 33°10.040' E	17,31	8,67
Черное море у мыса Тарханкут (вода; <i>Cystoseira</i> sp.; <i>Phyllophora</i> sp.)	19.02.2013	45°20.922' N 32°29.659' E	17,63	8,52
Черное море у г. Евпатория (вода)	19.02.2013	45°10.635' N 33°26.832' E	17,49	8,50

Киятское и Кирлеутское озера входят в Перекопскую группу соленых озер Крыма, имеют материковое происхождение (Понизовский, 1965). Длина Киятского озера 10 км, максимальная ширина 2,5 км, средняя глубина 2 м, наибольшая 4 м, площадь озера 12,5 км², площадь водосбора 68,4 км².

Его раствор характеризуется повышенным содержанием NaCl (83,8 %) и MgCl₂ (13 %) (Понизовский, 1965). Группа гидрологического режима – бессточное. Питание озера происходит за счет подземных вод Причерноморского артезианского бассейна, сбросных и дренажных вод. Озеро Киятское было

соединено с дренажной системой и СКК, в него производился многолетний сброс сточных вод Крымского содового завода (Северокрымский промышленный комплекс) (Озера Крыма, 2014). Кирлеутское озеро является третьим по площади (20,8 км²) среди озер Перекопской группы: общая площадь водосбора составляет 101 км², длина 13 км, наибольшая ширина 3 км, наибольшая глубина 3 м. Озеро не используется в хозяйственной деятельности. На берегах гнездятся птицы (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014). По химическому составу Кирлеутское озеро относится к соленым озерам первого класса, рассолы которых, в основном, включают хлористый натрий, калий, магний, сернокислый магний и кальций. Питание – подземные воды Причерноморского артезианского бассейна, сбросные и дренажные воды. Впадает безымянная река (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014).

Озера Чокракское, Акташское, Кояшское входят в Керченскую группу соленых озер. Озеро Чокракское имеет длину 4,1 км, его максимальная ширина 3,6 км, площадь 8,5 км², средняя глубина 0,85 км, площадь водосбора 74 км². Впадающая река – Безымянная. Озеро питается также подземными сероводородными лечебными источниками и морскими водами. Озеро Акташское – пересыхающее соленое озеро на севере Керченского полуострова, четвертое по площади озеро Крыма. Его площадь 26,8 км², длина 8 км, максимальная ширина 3,5 км, средняя глубина 2 м, площадь водосбора 467 км². Происхождение – лиманное. Группа гидрологического режима – бессточное. Отводным каналом соединено с СКК. Озеро Кояшское имеет морское происхождение (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014). Длина озера 3,84 км, максимальная ширина 2,81 км, площадь водосбора 23 км². Озеро Кояшское является наиболее

соленым среди соленых озер Крыма (от 184 до 340 ‰) (Балушкина и др., 2009; Хоменко, Шадрин, 2009; Гулина, Гулин, 2011). Питание – поверхностные, морские и подземные воды Причерноморского артезианского бассейна. Группа гидрологического режима – бессточное. Кояшское озеро входит в состав государственного природного заповедника «Опукский». Озеро используется для рекреации.

Для проведения сравнительного анализа по содержанию ^{90}Sr были отобраны пробы на контрольных станциях в черноморских акваториях, расположенных поблизости от исследуемых соленых озер (рис. 1, табл. 1).

Материалом исследования служили вода, донные отложения, водные растения (*Cladophora* sp., *Cystoseira* sp., *Phyllophora* sp., *Potamogeton* sp.), которые были отобраны в зависимости от возможности осуществления пробоотбора и наличия гидробионтов в изучаемых соленых озерах Крыма и прибрежных районах Черного моря (табл. 1).

Метод определения ^{90}Sr в объектах окружающей среды, соответствующий общепринятым в мировой практике, основан на радиохимическом выделении радионуклида, измерении активности ^{90}Sr по черенковскому излучению его дочернего продукта ^{90}Y с использованием низкофонового жидкостного сцинтилляционного счетчика (LSC) LKB Quantulus 1220, последующей математической обработке данных (Harvey et al., 1989; Поликарпов и др., 2008). Нижний предел определяемой активности (LLD) составляет 0,01–0,04 Бк/кг (Бк/м³) пробы. Используемая вычислительная схема для определения концентрации и погрешностей определения ^{90}Sr в воде, гидробионтах, донных отложениях позволила корректно оценивать степень их загрязнения этим радионуклидом. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20 %.

Расчет радиационных доз для популяций гидробионтов, обитающих в исследуемых водоемах, основывался на использовании коэффициента DCF (дозового конверсионного фактора, Гр/год/Бк/кг) для ^{90}Sr и на определении суммарной дозы, получаемой гидробионтами от внешнего (вода и донные отложения) и внутреннего облучения этим радионуклидом (Amigo, 1997; US DOE Standard, 2001). Полученные результаты сравнивали с пределом дозы в 10 мГр в день, не вызывающей регистрируемых изменений в природных популяциях гидробионтов (US DOE Standard, 2001, 2002) и со шкалой Зон хронического действия ионизирующего излучения, предложенной Г.Г. Поликарповым (Polikarpov, 1998; Поликарпов и др., 2008; Mirzoyeva et al., 2013).

Результаты и обсуждение

Первые определения содержания послеварийного ^{90}Sr в воде соленых озер Крыма были выполнены нами в 2013 г. для озера Киятского (рис. 1, табл. 1) при проведении радиоэкологического исследования этого объекта в качестве модели бессточной водной экосистемы (Mirzoyeva et al., 2014, 2015). Было обнаружено, что на долю донных отложений и водных растений пришлось не более чем сотая доля процента от общего содержания радионуклида в экосистеме озера. Распределение радионуклида по компонентам водоема имело следующий характер: $350,5 \pm 15,8$ Бк/м³ – в воде, $0,3 \pm 0,04$ Бк/кг сырой массы – в водных растениях, $0,5 \pm 0,2$ Бк/кг сухой массы – в донных отложениях. Подобный уровень концентраций ^{90}Sr в воде отмечался в 1992 и 1999 гг. в воде Киевского водохранилища (Мирзоева, 2013; Mirzoyeva et al., 2013). Тогда как в 2013 г. концентрация ^{90}Sr в черноморской воде вдоль побережья Крыма не превышала доаварийного уровня радионуклида, который составлял $15,2 \pm 1,8$ Бк/м³ (Поликарпов и др., 2008).

Для выяснения источника поступления ^{90}Sr в озеро Киятское активность радионуклида (с учетом периода полураспада) была рассчитана на май 1986 г., т.е. восстановлена ко времени первичного поступления послеварийных радионуклидов с воздушными массами на территорию Крыма сразу после аварии на ЧАЭС. Это значение составило $730,2$ Бк/м³ и соответствовало концентрации ^{90}Sr , поступившего водным путем из аварийного района по каскаду Днепровских водохранилищ в Каховское водохранилище, СКК на территорию Крыма уже к началу 1987 г. (рис. 2).

Среди всех исследуемых водных объектов наибольшая концентрация искусственного радионуклида ^{90}Sr в воде наблюдалась в озерах Перекопской группы (озера Киятское и Кирлеутское) независимо от периода отбора проб (табл. 2).

Повышенная концентрация поставарийного ^{90}Sr в воде озер Киятского и Кирлеутского обусловлена, прежде всего, значительным антропогенным прессом на исследуемые экосистемы, а также особенностями гидрологических, гидрохимических характеристик водоемов. Озера имеют бессточный гидрологический режим, а сбросные и дренажные системы СКК (Понизовский, 1965; Озера Крыма, 2014), привнесившие до 2014 г. в водоемы днепровские воды, обеспечивали хроническое вторичное поступление растворенного стронция из аварийного региона (Gulin et al., 2013; Polikarpov et al., 2015). Считаем, что многолетний сброс сточных вод Крымского содового завода, который в своем рабочем цикле использовал как воды СКК, так и воды соленого озера Сиваш, также являлся дополнительным источником поступления ^{90}Sr в эти озера в период после аварии на ЧАЭС (Поликарпов и др., 2008; Mirzoyeva et al., 2013, 2014, 2015). В мае и ноябре 2014 г. концентрация ^{90}Sr в воде озера Киятского была в 3,6 и 2,7 раза

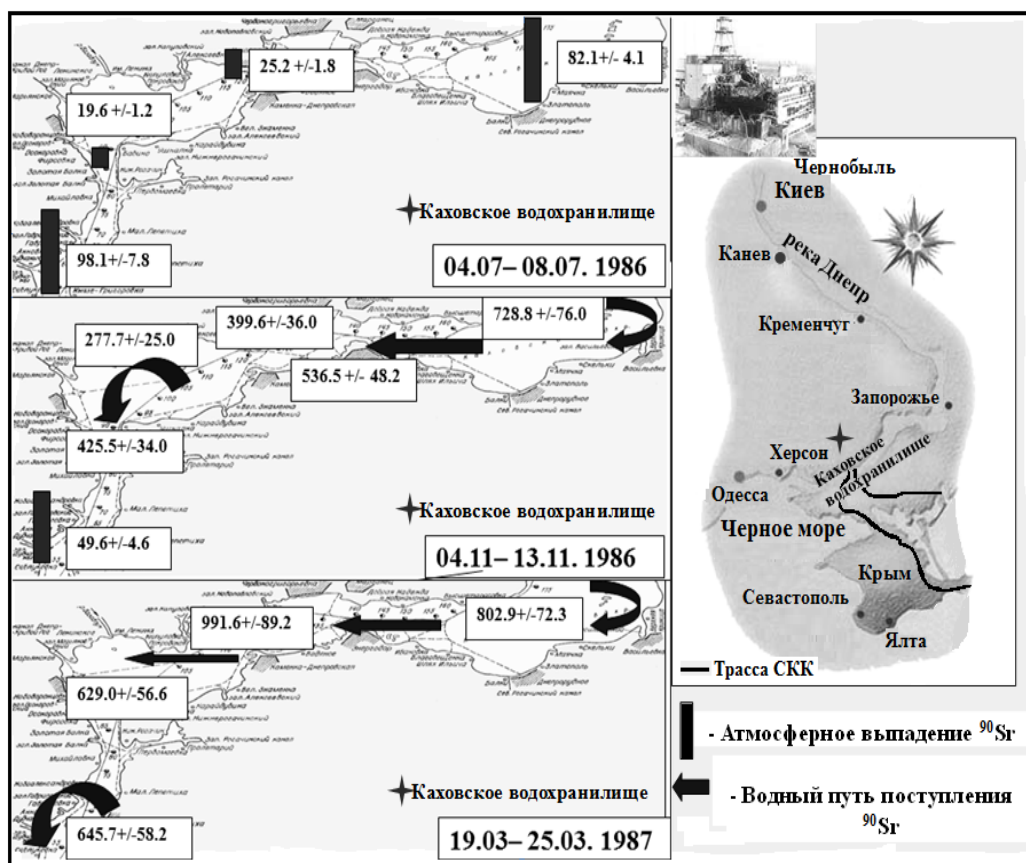


Рис. 2. Поступление ^{90}Sr (Бк/м³) в Каховское водохранилище в 1986–1987 гг. (Мирзоева, 2013; Mirzoyeva et al., 2013, рисунок публикуется впервые)

Таблица 2. Концентрация ^{90}Sr в воде соленых озер Крыма и близлежащих районов Черного моря

Название объектов исследования	Дата отбора проб	Соленость, ‰	Концентрация ^{90}Sr , Бк/м ³
Озеро Киятское	19.02.2013	82,55	350,5 ± 15,8
	13.05.2014	106,60	98,0 ± 5,2
	18.11.2014	154,10	129,0 ± 7,5
Озеро Кирлеутское	13.05.2014	184,00	121,3 ± 7,1
	18.11.2014	271,00	52,9 ± 8,4
Озеро Бакальское	19.02.2013	17,94	12,5 ± 1,6
Озеро Донузлав	19.02.2013	16,19	11,3 ± 1,6
Озеро Кызыл-Яр	13.05.2014	1,90	9,6 ± 0,8
Море у оз. Бакальское	19.02.2013	17,31	12,5 ± 1,6
Море у мыса Тарханкут	19.02.2013	17,63	24,8 ± 2,1
Море у г. Евпатория	19.02.2013	17,49	15,5 ± 1,6
Водопроводная вода в лаборатории ОРХБ	19.05.2014	пресная	3,0 ± 0,7

ниже соответственно, чем в феврале 2013 г. В озере Кирлеутском наблюдалось снижение содержания этого радионуклида в воде с мая по ноябрь в 2,3 раза (табл. 2). Это, вероятно, вызвано прекращением подачи воды в Крым через СКК (Ukraine builds dam..., 2014; СМИ, 2014), перераспределением ^{90}Sr между компонентами экосистемы озера, депонированием радионуклида прежде всего в донные отложения водоема.

На контрольных станциях 1, 3 отбора проб (рис. 1, табл. 2) концентрация ^{90}Sr в воде Черного моря вдоль Северо-Западной части Крымского полуострова не превышала доаварийные уровни (Mirzoyeva et al., 2013). Это объясняется тем, что биогеохимические и гидрологические процессы, происходящие в экосистемах Черного моря, уменьшают время нахождения поставарийных радионуклидов ^{90}Sr в среде на 106–127 лет (Мирзоева, 2013; Mirzoyeva et al., 2013). Определено

(табл. 2, рис. 3, 4), что в морской воде возле мыса Тарханкут, воде соленых озер Кирлеутском и Киятском концентрации ^{90}Sr в 1,7–23,4 раза превышают содержание этого радионуклида в водоемах Крыма до аварии на ЧАЭС (Поликарпов и др., 2008). Незначительное по отношению к содержанию радионуклида на других контрольных станциях отбора проб превышение концентрации ^{90}Sr в морской воде возле мыса Тарханкут было ожидаемым (Мирзоева, 2013; Mirzoyeva et al., 2013). Оно определялось хроническим вторичным поступлением ^{90}Sr с водами Днепра через сбросные ответвления СКК (Мирзоева, 2013; Gulin et al., 2013; Mirzoyeva et al., 2013), а также гидрологическими и биогеохимическими процессами, происходящими в морской экосистеме изучаемого района. Выявлено, что величина концентрации растворенного ^{90}Sr в водной среде соленых озер Крыма зависит от источника поступления этого радионуклида

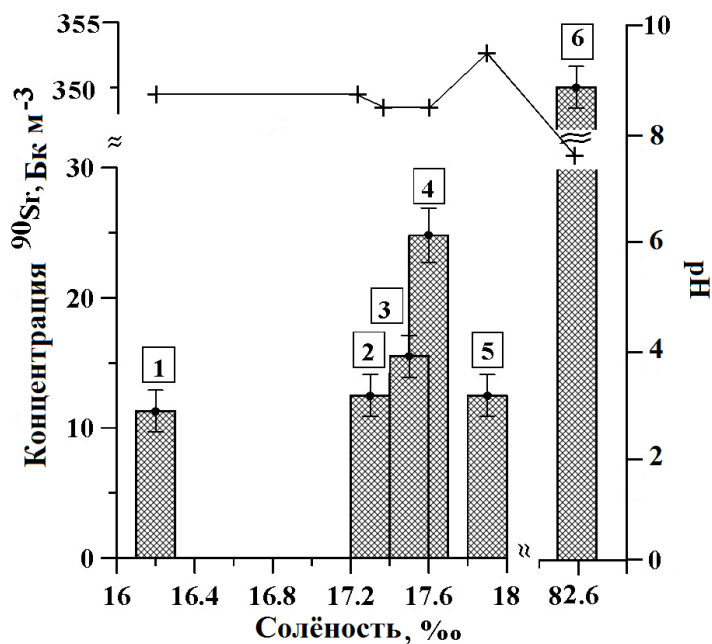


Рис. 3. Концентрация ^{90}Sr (столбики) в воде соленых озер Крыма и контрольных районов отбора проб в Черном море в феврале 2013 г. (1 – озеро Донузлав, 2 – море в районе озера Бакальское, 3 – море в районе г. Евпатория, 4 – море в районе мыса Тарханкут, 5 – озеро Бакальское, 6 – озеро Киятское) в зависимости от уровня солености и pH воды (крестики)

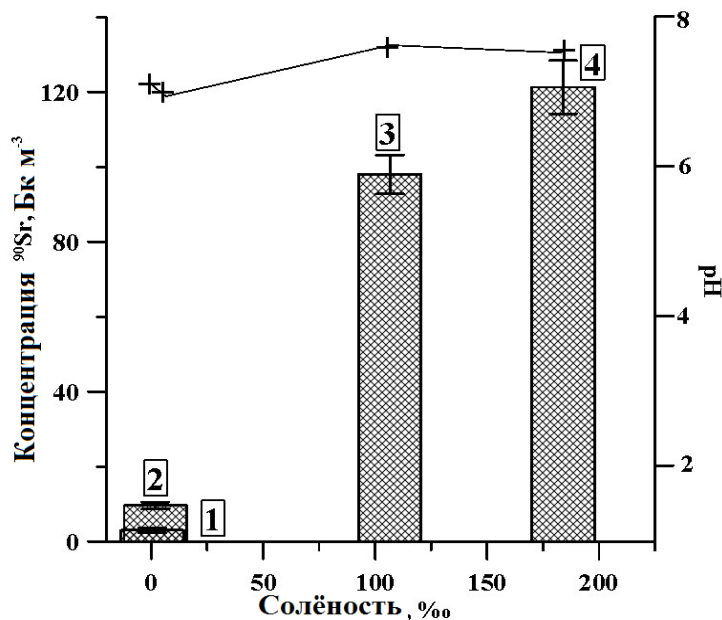


Рис. 4. Концентрация ^{90}Sr (столбики) в воде соленых озер Крыма в мае 2014 г. (2 – озеро Кызыл-Яр, 3 – озеро Киятское, 4 – озеро Кирлеутское) и контрольной пробе воды (1 – водопроводная вода лаборатории ОРХБ) в зависимости от уровня солёности и pH воды (крестики)

в водные экосистемы (в первую очередь), от уровня солёности рассолов озер и не зависит от pH среды (табл. 1, 2, рис. 3, 4).

Известно (Понизовский, 1965), что хлориды щелочных металлов и другие соли резко повышают растворимость стронциевых солей. Так, при содержании 15 % хлористого натрия в воде растворимость сульфата стронция возрастает в 13 раз по сравнению с его растворимостью в дистиллированной воде. Определено (Понизовский, 1965; Зайцев, 1998), что в Черном море и соленых озерах Крыма диапазон содержания NaCl в % к общей сумме солей независимо от уровня солёности воды составляет 72,8–83,8 % (с минимальным значением в оз. Кирлеутском, с максимальным – в оз. Киятском). Это позволяет послеварийному ^{90}Sr находиться преимущественно в ионной форме в водных экосистемах соленых озер Крыма.

Отметим, что в 2013–2014 гг. концентрация ^{90}Sr в воде всех исследуемых соленых

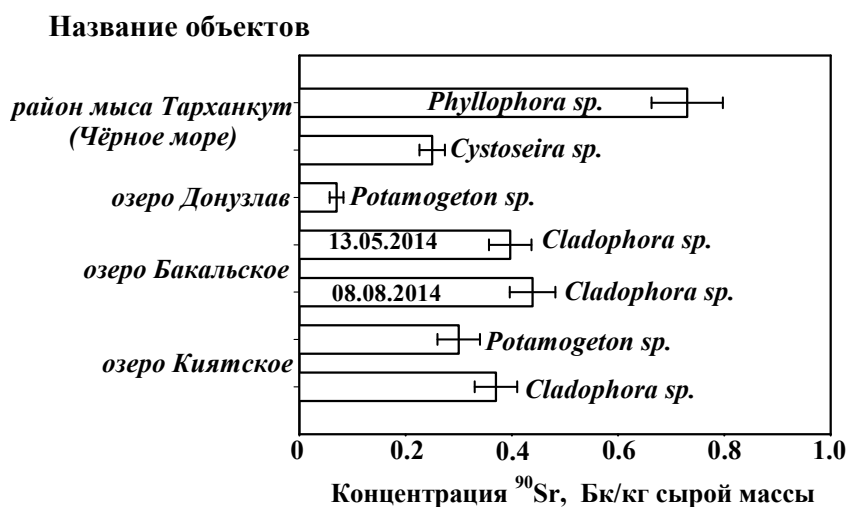
озер Крыма и контрольных станций отбора проб не превышала ПДК для ^{90}Sr в питьевой воде (НРБ–99/2009).

Концентрация ^{90}Sr в водных растениях родов *Potamogeton* и *Cladophora* озер Киятского и Бакальского с различным уровнем солёности находилась в пределах диапазона относительных погрешностей средних значений измеряемых активностей и составляла $0,30 \pm 0,04$ – $0,44 \pm 0,04$ Бк/кг сырой массы. Концентрация ^{90}Sr в высшем водном растении *Potamogeton* sp. из оз. Донузлав была на уровне предела обнаружения и составляла $0,07 \pm 0,01$ Бк/кг сырой массы (табл. 3, рис. 5). При этом коэффициенты накопления (Кн) ^{90}Sr в водных растениях из оз. Бакальское лиманного происхождения и Черного моря (табл. 3) соответствовали диапазону изменения Кн в цистозире Черного моря (16,7–60,1) (Поликарпов и др., 2008).

Ранее было определено (Поликарпов и др., 2008; Mirzoyeva et al., 2013), что в пре-

Таблица 3. Средние концентрации ($n=2$) и коэффициенты накопления (Кн) ^{90}Sr в водных растениях соленых озер Крыма и прилегающих районов Черного моря (отбор проб 2013-2014 гг.)

Название объектов исследования	Соленость, ‰	Концентрация ^{90}Sr в воде, Бк/м ³	Концентрация ^{90}Sr в растениях, Бк/кг W.W.	Кн
Озеро Киятское	82,55	350,5 ± 15,8	0,34 ± 0,04	0,97
Озеро Бакальское	17,94	12,5 ± 1,6	0,42 ± 0,04	33,60
Озеро Донузлав	16,19	11,3 ± 1,6	0,07 ± 0,01	6,20
Море у мыса Тарханкут	17,63	24,8 ± 2,1	0,63 ± 0,04	25,40

Рис. 5. Концентрация ^{90}Sr в водных растениях, отобранных из соленых озер Крыма и прибрежных районов Черного моря (район мыса Тарханкут), отбор проб 2013–2014 гг.

сных водоемах Украины нитчатые зеленые водоросли из рода *Cladophora* и высшие водные растения из рода *Potamogeton* являются индикаторными в отношении накопления ^{90}Sr в пресноводных гидрофитах и имеют значительные коэффициенты накопления, изменяющиеся в диапазоне 12–1025. Считаем, что низкие Кн ^{90}Sr для водных растений из оз. Киятского (*Cladophora* sp., *Potamogeton* sp.) и оз. Донузлав (*Potamogeton* sp.), равные 0,97 и 6,2 соответственно, можно объяснить наличием солей в исследуемых объектах, которые, на наш взгляд, выступают мешающим фактором в механизме поглощения радионуклидов стронция из

водной среды изначально пресноводными видами растений.

Показано (рис. 6), что перераспределение ^{90}Sr по цепи «вода – донные отложения – водные растения» в соленых озерах Крыма незначительно. Концентрация ^{90}Sr в донных отложениях озер Киятское и Кирлеутское (рис. 7), несмотря на значительное содержание радионуклида в воде, была почти в 6 раз ниже средней концентрации ^{90}Sr в донных отложениях Севастопольских бухт (Мирзоева, 2013) и составляла $0,45 \pm 0,22$ и $0,62 \pm 0,23$ Бк/кг сухой массы соответственно. И только в донных отложениях озер Акташское и Джарылгач (рис. 7) концентрация

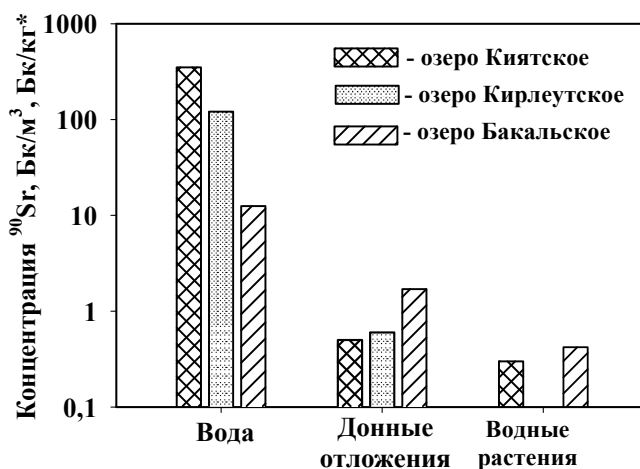


Рис. 6. Перераспределение ^{90}Sr по компонентам экосистемы солёных озёр Крыма (* – Bq/m^3 – для воды; Bq/kg сухой массы – для донных отложений; Bq/kg сырой массы – для гидробионтов)



Рис. 7. Концентрации ^{90}Sr в донных отложениях солёных озёр Крыма (отбор проб 2014 г.) и Севастопольских бухт (отбор проб 2012 г. (Мирзоева, 2013))

^{90}Sr превышала в 1,4–4,5 раза измеренные активности этого радионуклида в донных отложениях Севастопольских бухт (Мирзоева, 2013).

Расчет радиационных доз для популяций водных растений, обитающих в исследуемых водоемах, был произведен на примере оз. Киятского (с наибольшей концентрацией поставарийного радионуклида в воде). Он основывался на использовании

дозового конверсионного фактора DCF ($\text{Гр}/\text{год}/\text{Bq}/\text{kg}$) для ^{90}Sr , определении суммарной дозы, получаемой гидробионтами от внешнего (вода и донные отложения) и внутреннего облучения этим излучателем (Amiro, 1997; US DOE Standard, 2001, 2002). По нашим расчетам суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения, полученные водными растениями из оз. Киятского от поставарийного ^{90}Sr , составили $3,2 \times 10^{-6}$ Гр/

год. По шкале Зон хронического действия ионизирующего излучения (Polikarpov, 1998) они находились в течение всего периода исследования (2013–2014 гг.) в пределах «зоны неопределенности», уровни мощностей доз в которой ниже наименьшего уровня природного фона (Поликарпов и др., 2008). Согласно уровням концентрации ^{90}Sr в воде, донных отложениях, гидрофитах других исследуемых нами соленых озер Крыма и прибрежной части Черного моря (табл. 2, 3, рис. 7) дозовые нагрузки на гидрофиты из этих водных экосистем находились в пределах «зоны неопределенности». Следовательно, то количество послеаварийного ^{90}Sr , которое попало в воду соленых озер Крыма и рядом с ними расположенных экосистем Черного моря, сформировало в гидрофитах исследуемых водоемов поглощенные дозы, не оказавшие заметного радиационного воздействия на водные растения в период после аварии на ЧАЭС.

Заключение

В результате проведенных исследований было определено, что наибольшие концентрации искусственного радионуклида ^{90}Sr в 2013–2014 гг. были в воде соленых озер Крыма – Киятском ($350,5 \text{ Бк/м}^3$) и Кирлеутском ($121,3 \text{ Бк/м}^3$). Это обусловлено прежде всего сбросом в озера Перекопской группы днепровских вод из СКК, что вызывало хроническое вторичное поступление послеаварийного ^{90}Sr в экосистемы водоемов. В результате исследований было определено, что величина концентрации растворенного ^{90}Sr в водной среде соленых озер Крыма зависит от наличия источника вторичного загрязнения среды этим послеаварийным радионуклидом, от уровня солености рассолов озер и не зависит от pH-среды. В 2013–2014 гг. концентрация ^{90}Sr в воде всех исследуемых соленых

озер Крыма и контрольных станциях отбора проб не превышала ПДК для ^{90}Sr в питьевой воде (НРБ–99/2009). Установлено, что перераспределение ^{90}Sr по цепи «вода – донные отложения – водные растения» в соленых озерах Крыма незначительно. Основная часть ^{90}Sr находится в водной среде исследуемых водоемов, что обусловлено значительным содержанием NaCl . Низкие Кн ^{90}Sr для водных растений из оз. Киятского (*Cladophora* sp., *Potamogeton* sp.) и оз. Донузлав (*Potamogeton* sp.), равные 0,97 и 6,2 единиц соответственно, можно объяснить наличием солей в воде исследуемых объектов, что влияет на механизм поглощения радионуклидов стронция изученными растениями. Количество послеаварийного ^{90}Sr , попавшего в соленые озера Крыма и прилегающую к их территории прибрежную часть Черного моря, сформировало в гидрофитах исследуемых водоемов поглощенные дозы ($3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гр/год}$), что позволяет сделать вывод об отсутствии негативного влияния антропогенного радиационного фактора – поставарийного ^{90}Sr – на гидробионтов водоемов в современных условиях.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант № 16-05-00134.

Автор искренне признательна В.Н. Поповичеву, научному сотруднику ОРХБ ФГБУН ИМБИ РАН, за участие во всех научных экспедициях и помощь в отборе проб из соленых озер Крыма. Автор выражает глубокую благодарность старшему научному сотруднику отдела физиологии животных и биохимии ФГБУН ИМБИ РАН Н.В. Шадрину за научные консультации по данной проблеме, а также анонимным рецензентам, советы которых содействовали улучшению рукописи.

Список литературы

Апплби Л.Дж., Девелл Л., Мишра Ю.К. (1999) Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля. Пер. с англ. Уорнер Ф., Харрисон Р. (ред.) М., Мир, 512 с. [Appleby L.J., Devell L., Mishra Yu.K. (1999) *The ways of migration of artificial radionuclides in the environment. Radioecology after Chernobyl*. Transl. from Engl. Warner F. and Harrison R. (eds.) Moscow, Mir, 512 p. (in Russian)]

Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф., Калугин А.К., Кузьмин И.И., Кулаков В.М., Легасов В.А., Лунин Г.Л., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н., Сухоручкин В.К., Хрулев А.А., Шах О.Я., Адамов Е.О., Подлазов Л.Н., Черкашов Ю.М., Абагян А.А., Дмитриев В.М., Шкурне-лов А.А., Ильин Л.А. (1988) Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя. *Атомная энергия*, 64 (1): 3-23 [Asmolov V.G., Borovoy A.A., Dyomin V.F., Kalugin A.K., Kuzin I.I., Kulakov V.M., Legasov V.A., Lunin G.L., Ponomarev-Stepnoi N.N., Protsenko A.N., Sukhoruchkin V.K., Hrulev A.A., Shakh O.Ya., Adamov E.O., Podlazov L.N., Cherkashov Yu.M., Abagyan A.A., Dmitriev V.M., Shkurnelov A.A., Ilyin L.A. (1988) The Chernobyl NPP accident: a year later. *Atomic Energy* [Atomnaya ehnergiya], 64 (1): 3-23 (in Russian)]

Балушкина Е.В., Голубков С.М., Голубков М.С., Литвинчук Л.Ф., Шадрин Н.В. (2009) Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем соленых озер Крыма. *Журнал общей биологии*, 70 (6): 504-514 [Balushkina E.V., Golubkov S.M., Golubkov M.S., Litvinchuk L.F., Shadrin N.V. (2009) Influence of abiotic and biotic factors on the structural and functional organization of ecosystems of salt lakes of the Crimea. *Journal of General Biology* [Zhurnal obshchej biologii], 70 (6): 504-514 (in Russian)]

Бульон В.В., Анохина Л.Е., Аракелова Е.С. (1989) Первичная продукция гипергалинных озер Крыма. *Труды Зоологического института АН СССР*, 205: 14-25 [Bulyon V.V., Anokhina L.E., Arakelova E.S. (1989) Primary production hypersaline lakes of the Crimea. *Proceedings of the Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences* [Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR], 205: 14-25 (in Russian)]

Гулина Л.В., Гулин С.Б. (2011) Природные и техногенные радионуклиды в экосистеме соленого озера Кояшское (Юго-Восточный Крым). *Морской экологический журнал*, 1 (10): 19-25 [Gulina L.V., Gulin S.B. (2011) Natural and artificial radionuclides in the ecosystem of the salt lake Koyashskoe (South-East Crimea). *Marine Ecological Journal* [Morskoj ehkologicheskij zhurnal], 1 (10): 19-25 (in Russian)]

Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г., Стокозов Н.А., Евтушенко Д.Б. (1993) Модель крупномасштабного загрязнения Черного моря долгоживущими радионуклидами цезием-137 и стронцием-90 в результате аварии на ЧАЭС. *Водные ресурсы*, 20 (3): 326-330 [Egorov V.N., Polikarpov G.G., Kulebakina L.G., Stokozov N.A., Evtushenko D.B. (1993) Model of large-scale pollution of the Black Sea by the long-lived radionuclides cesium-137 and strontium-90 as a result of the Chernobyl NPP accident. *Water resources* [Vodnye resursy], 20 (3): 326-330 (in Russian)]

Зайцев Ю.П. (1998) *Самое синее в мире*. Нью-Йорк, ООН, 142 с. [Zaytsev Yu.P. (1998) *The most blue in the world*. New York, United Nations, 142 p. (in Russian)]

Израэль Ю.А. (1998) Радиоактивное загрязнение земной поверхности. *Вестник РАН*, 68 (10): 116-131 [Izrael Yu.A. (1998) Radioactive contamination of the Earth's surface. *Herald of the RAS* [Vestnik RAN], 68 (10): 116-131 (in Russian)]

Израэль Ю.А., Петров В.Н., Авдюшкин С.А. (1987) Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции. *Метеорология и гидрология*, 2: 5-18 [Izrael Yu.A., Petrov V.N., Avdyushkin S.A. (1987) Radioactive contamination of the natural environment in the area of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Meteorology and Hydrology* [Meteorologiya i gidrologiya], 2: 5-18 (in Russian)]

Ильин Л.А., Павловский О.А. (1988) Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и меры, предпринятые с целью их смягчения. *Атомная энергия*, 65 (2): 119-129 [Ilyin L.A., Pavlovsky O.A. (1988) Radiological consequences of the Chernobyl NPP accident and the measures taken to mitigate them. *Atomic Energy* [Atomnaya ehnergiya], 65 (2): 119-129 (in Russian)]

Мирзоева Н.Ю. (2013) ^{90}Sr и ^{137}Cs в севастопольских бухтах после аварии на Чернобыльской АЭС, биогеохимические факторы самоочищения экосистем. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сборник научных трудов*. Выпуск 27. Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, с. 266-270 [Mirzoyeva N.Yu. (2013) ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Sevastopol bay, after the Chernobyl accident, self-cleaning ecosystem biogeochemical factors. *Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources: collection of scientific papers*. Issue 27. Sevastopol, ECOSY-Hydrophysics, p. 266-270 (in Russian)]

Нелепо Б.А. (1970) *Ядерная гидрофизика*. М., Атомиздат, 224 с. [Nelepo B.A. (1970) *Nuclear hydrophysics*. Moscow, Atomizdat, 224 p. (in Russian)]

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.6.1.2523-09): Утв. и введ. в действие от 1 сентября 2009 г. взамен СанПиН 2.6.1.758 – 99. Зарегистрированы в Министерстве юстиции РФ 14.08.2009, рег. № 14534: <http://base.garant.ru/4188851/#1000> [*Radiation Safety Standards (NRB-99/2009): The sanitary rules and regulations (SanPiN 2.6.1.2523-09): Approved. and enter. in effect from 1 September 2009 to replace SanPin 2.6.1.758 – 99*. Registered with the Ministry of Justice 14.08.2009, Reg. Number 14534: <http://base.garant.ru/4188851/#1000> (in Russian)]

Озера Крыма: http://журналкрым.рф/reki_i_ozera.../print:page,1,481-ozera-kryma.html, 20.02.2014 [The lakes of the Crimea: http://журналкрым.рф/reki_i_ozera.../print:page,1,481-ozera-kryma.html, 20.02.2014 (in Russian)]

Первольф Ю.В. (1953) Илы и условия их илообразования в соляных озерах Крыма. *Труды лаборатории озероведения АН СССР*, 2: 154-228 [Pervolf Yu.V. (1953) Silts and conditions of their formation in the salt lakes of the Crimea. *Proceedings of the Laboratory of the Limnology of USSR Academy of Sciences* [Trudy laboratorii ozerovedeniya AN SSSR], 2: 154-228 (in Russian)]

Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терешенко Н.Н., Цыцугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичево В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. (2008) *Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию*. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. (ред.) Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 667 с. [Polikarpov G.G., Egorov V.N., Gulin S.B., Stokozov N.A., Lazorenko G.E., Mirzoyeva N.Yu., Tereschenko N.N., Tsitsugina V.G., Kulebakina L.G., Popovichev V.N., Korotkov A.A., Evtushenko D.B., Zherko N.V., Malakhova L.V. (2008) *Radioecological response of the Black Sea to the Chernobyl accident*. Polikarpov G.G., Egorov V.N. (eds.) Sevastopol, ECOSY-Hydrophysics, 667 p. (in Russian)]

Понизовский А.М. (1965) *Соляные ресурсы Крыма*. Симферополь, Крым, 166 с. [Ponizovskii A.M. (1965) *Salt resources of the Crimea*. Simferopol, Crimea, 166 p. (in Russian)]

СМИ: Украина признала, что прекратила поставлять воду в Крым (13 мая 2014 г.): <http://russian.rt.com/article/31752#ixzz3326g7UH>
russian.rt.com/article/31752

Хоменко С.В., Шадрин Н.В. (2009) Иранский эндемик артемия урмиана в гиперсоленом озере Кояшское (Крым, Украина): предварительное обоснование заноса птицами. *Бранта: Сборник научных трудов Азово-Черноморской орнитологической станции*: 81-91 [Homenko S.V., Shadrin N.V. (2009) Iranian endemic *Artemia urmiana* in hypersaline lake Koyashskoe (the Crimea, Ukraine): a preliminary justification of the bringing by birds. *Brant: Collection of scientific works of the Azov-Black Sea Ornithological Station* [Branta: Cbornik nauchnyh trudov Azovo-Chernomorskoj ornitologicheskoy stancii]: 81-91 (in Russian)]

Шадрин Н.В., Голубков С.М., Балушкина Е.В., Орлеанский В.К., Миходюк О.С. (2004) Отклик экосистемы гиперсоленого Бакальского озера (Крым) на климатические особенности 2004 года. *Морской экологический журнал*, 3 (4): 74 [Shadrin N.V., Golubkov S.M., Balushkina E.V., Orleanskiy V.K., Mikhoduik O.S. (2004) The response of the ecosystem of the hypersaline lake Bakalskoe (Crimea) on the climatic features of 2004. *Marine Ecological Journal* [Morskoj ehkologicheskij zhurnal], 3 (4): 74 (in Russian)]

Amiro B.D. (1997) Radiological dose conversion factors for generic non-human biota used for screening potential ecological impacts. *Journal Environmental Radioactivity*, 35 (1): 37-51

Fukushima Daiichi accident (2015) Vienna, International Atomic Energy Agency, 249 p.

Gudiksen P.H., Harvey T.F., Lange R. (1989) Chernobyl source term, atmospheric dispersion and dose estimation. *Journal Health Physics*, 57 (5): 697-705

Gudiksen P.H., Harvey T.F., Lange R. (1991) Chernobyl Source Term Estimation. *Proc. Seminar on Comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl, 1-5 October 1990, Luxembourg*. Ed. by Commission of the EC, Directorate-General XI, Environment, Civil Protection and Nuclear Safety. Commission of the EC "Radiation protection-53", Report EUR 13574, p. 93-112

Gulin S.B., Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G., Sidorov I.G., Proskurnin V.Yu. (2013) Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends. *Journal of Environmental Radioactivity*, 124: 50-56

Harvey B.K., Ibbett R.D., Lovett M.B., Williams K.J. (1989) *Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials. Aquatic Environmental Protection: Analytical Methods*. Lowestoft, 33 p.

Joseph A.B., Gustafson P.F., Russell I.R., Schuert E.A., Volchok H.L., Tamplin A. (1971) Sources of radioactivity and their characteristics. *Radioactivity in the marine environment*. NAS, p. 6-41

Livingston H., Clarke W., Honjo S., Izdar E., Konuk T., Degens E., Ittekkot V. (1986) Chernobyl fallout studies in the Black Sea and other oceans areas. *Environmental Marine Laboratory*, 460: 214-223

Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G. (2013) Distribution and migration of ^{90}Sr in components of the Dnieper River basin and the Black Sea ecosystems after the Chernobyl NPP accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 125: 27-35

Mirzoyeva N., Gulin S., Plotisina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. (2014) Radiochemoecological monitoring of the Salt Lakes of the Crimea. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88 (supp. 1): 155-157

Mirzoyeva N., Gulina L., Gulin S., Plotitsina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. (2015) Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33 (6): 1413-1425

Polikarpov G.G. (1966) *Radioecology of Aquatic Organisms*. V. Schults and A. Klement (eds.) Jr. – Amsterdam, North-Holland Publ. Co., New York, Reinhold Book Division, 314 p.

Polikarpov G.G. (1998) Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment. *Radiation Protection Dosimetry*, 75 (1-4): 181-185

Polikarpov G.G., Lazorenko G.E., Tereshchenko N.N., Mirzoyeva N.Yu. (2015) The Northern-Crimean Canal as a model object of radioecological study the transport of the Chernobyl radionuclides to the Black Sea. *Marine Hydrophysical Journal* [Morskoy gidrofizicheskij zhurnal], 3: 27-36

Shadrin N.V., Anufrieva E.V. (2013) Climate change impact on the marine lakes and their crustaceans: The case of marine hypersaline Lake Bakalskoye (Ukraine). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13: 603-611

Shadrin N., Anufrieva E., Galagovets E. (2012) Distribution and historical biogeography of *Artemia leach*, 1819 (Crustacea: Anostraca) in Ukraine. *Int. J. Artemia Biology*, 2 (2): 30-42

US DOE. United States Department of Energy. DOE Standard. (2001) A Graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. №. ENVR-0011: Third Printing, 347 p.

US DOE. United States Department of Energy. DOE Standard. (2002) Graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. DOE-STD-1153-2002, July 2002. AREA ENVR. Washington, D.C. (USA), US DOE, 48 p.

Ukraine builds dam on North Crimean Canal to block water supply to Crimea (14 May 2014): <http://www.youtube.com/watch?v=l237OJxZVKw> Accessed on 14.05.2014. (in English)

Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B., Katrich I.Yu., Voitsekhovitch O.A., Medinets V.I., Pisarev V.V., Bovkum L.A., Khersonsky E.S. (1994) Caesium-137 and Strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant accident: an overview. *Journal of Environmental Radioactivity*, 23: 103-122