

---

УДК 577.34:001.5 (28)

*М. И. Кузьменко, В. Д. Романенко*

**ЗНАЧЕНИЕ НАУЧНОГО НАСЛЕДИЯ  
В. И. ВЕРНАДСКОГО ДЛЯ РАЗВИТИЯ  
РАДИОЭКОЛОГИИ ПРИРОДНЫХ ВОД**

В. И. Вернадский впервые применил биогеохимический метод в изучении природной радиоактивности, выполнил радиогеологические исследования и установил роль радиоактивных элементов в биогидросфере. Результаты этих работ имели большое значение для решения важных практических задач, связанных с поиском урановых руд. Разработки и широкое распространение ядерных технологий, развитие атомной энергетики, аварии на предприятиях с ядерными технологиями, испытания ядерных вооружений привели к тотальному распространению в биосфере биологически опасных искусственных радионуклидов, что обуславливает актуальность системных радиоэкологических исследований наземных экосистем, континентальных водоёмов и Мирового океана и необходимость решения неотложных проблем глобальной гидроэкологической и радиоэкологической безопасности.

*Ключевые слова:* В. И. Вернадский, радиогеологические исследования, ядерные технологии, атомная энергетика, ядерные вооружения, радионуклидное загрязнение.

Конец XIX — начало XX веков ознаменовались выдающимися открытиями в области физики. В 1896 г. А. А. Беккерель открыл новое проникающее излучение, генерируемое ураном. В 1898 г. супруги П. Кюри и М. Склодовская-Кюри открыли новые радиоактивные элементы полоний и радий и заложили фундамент новой науки о радиоактивности. В 1903 г. П. Кюри, обратив внимание на то, что радий не только излучает невидимые лучи, но и выделяет при этом тепловую энергию, получил поражающий результат: за время радиоактивного распада 1 г радия выделяется в 400 тысяч раз больше энергии, чем освобождается при сгорании 1 г каменного угля. В 1905 г. Э. Резерфорд установил, что радиоактивный распад происходит со строго постоянной скоростью и что такие элементы, как U и Th, обладая длительным периодом полураспада, могут выступать в роли геологических часов. Эпохальные открытия в физике и их значение для формирования научных представлений о мироздании в те годы были понятны немногим. Среди этих немногих был В. И. Вернадский, который в 1911 г. прозорливо писал: «Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не может сравниться все, когда-либо им пережитое. Не далеко то время, когда человек получит в свои руки атомную энергию — такой источник силы, кото-

© М. И. Кузьменко, В. Д. Романенко, 2013

рый позволит ему строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться через столетие, но, ясно, что это обязательно случится. Сможет ли человек воспользоваться этой силой, направив ее на добро, а не на самоуничтожение?».

В 1911 г. В. И. Вернадский, после стажировки во Франции и Англии, организовал первую в России радиогеологическую экспедицию, и по её итогам опубликовал «Этюды по биогеохимии», в которых большое внимание уделялось роли радиоактивных элементов в биогидросфере. Последующими исследованиями была установлена способность живых организмов концентрировать химические элементы, что предвосхитило будущие радиоэкологические исследования. В результате В. И. Вернадский ввел в науку новое понятие — отношение концентрации радиоэлементов в организме (в расчете на сырую массу) и в воде. Это отношение как мера накопления радионуклида организмом из водной среды со временем получило название коэффициента накопления, или концентрирования. На основе биогеохимического метода изучения природной радиоактивности решались важные практические задачи, связанные с поиском урановых руд.

Среди морских и пресноводных гидробионтов встречаются виды, способные в больших количествах концентрировать как природные, так и техногенного происхождения радиоактивные элементы [28, 38]. Так, при содержании в воде стронция-90 в количестве 0,04—0,12 Бк/л коэффициент накопления этого радионуклида в представителях рода *Dreissena* достигает величин порядка  $10^2$ — $10^4$ .

Глобальная эволюция планеты Земля и формирование земной коры сопровождались неравномерным образованием геологических пород и распределением химических, в том числе и природных радиоактивных, элементов [2, 4—12, 33, 53, 54]. На нашей планете выявлены местности с отложениями пород с повышенным содержанием таких тяжелых радиоактивных элементов, как U и Th. Залежи урановой руды в больших количествах находятся в Австралии, Канаде, Конго, Южной Африке, США, Украине. Породы с монацитом — основным минералом, который содержит U и Th, найдены в Бразилии, Индии, Китае и США. В местностях, где породы, обогащенные U и Th, залегают близко к поверхности Земли, уровень природного радиоактивного фона в десятки, а то и в сотни раз выше, чем в местностях с низким содержанием радиоактивных элементов. Природные радиоактивные аномалии обнаружены в Бразилии, Индии, Иране, Франции. В природных радионуклидных аномалиях встречаются источники, в которых вода отличается высокой объёмной удельной активностью изотопов радона, преимущественно  $^{222}\text{Rn}$ . Так, в воде источника Будгайстана (Австрия) объёмная удельная активность радона составляет 111 Бк/л, а в источниках Хельсинки (Финляндия) — достигает 629 Бк/л [51].

Важное значение для развития науки и техники имело открытие в 1934 г. супругами Ирэн и Фредериком Жолио-Кюри искусственной радиоактивности. Из более 2000 ныне известных радиоактивных изотопов 340 выявлены в земной коре, остальные получены искусственно в результате ядерных реакций.

Открытия в ядерной физике, основополагающие идеи В. И. Вернадского в области радиозологии, природной радиоактивности и возможностей использования атомной энергии в практических целях положили начало широкому использованию радиоактивных веществ, источников ионизирующих излучений в науке, медицине, ядерной энергетике и других отраслях промышленности. Даже при нормальных условиях эксплуатации промышленных предприятий с ядерными технологиями предусмотрены нормируемые выбросы радиоактивных веществ в природную среду. В результате к природному радиоактивному фону Земли, который формируется космическим ионизирующим излучением и излучением природных радиоактивных элементов — изотопов U, Th и продуктов их распада, а также  $^{40}\text{K}$  и других элементов, поступление в биосферу искусственных радионуклидов стало дополнительным к природному фону фактором облучения всех живых организмов. Искусственные радионуклиды включились в эволюционно сформированные в биосфере биогеохимические циклы химических элементов [1, 16, 18, 23, 40—42, 44, 45].

С разработкой и распространением ядерных технологий создавались исследовательские лаборатории и центры. Несмотря на засекреченность исследований программ, связанных с изучением миграции радиоактивных веществ в природной среде, накопления в организмах и действия на их жизнедеятельность, к концу 1960-х гг. широкую известность приобрели Брукхейвенская, Окриджская и Хенфордская национальные лаборатории США, Центр ядерных исследований в Кадараше во Франции. Системные исследования миграции искусственных радионуклидов, их накопления в компонентах природной среды, дозы ионизирующих излучений и их действия на растительные и животные организмы проводились в Институте биологии Уральского филиала АН СССР (г. Свердловск) под руководством одного из основоположников современной радиационной генетики и теоретической радиобиологии Н. В. Тимофеева-Ресовского.

В 1950-х гг. в институтах АН УССР были начаты многолетние радиозологические исследования наземных и водных экосистем. В институте физиологии растений АН УССР Д. М. Гродзинский возглавил широкомасштабные работы по изучению природной радиоактивности почв, растений, воды и воздуха в разных почвенно-климатических зонах, содержания основных дозообразующих природных радиоактивных элементов U, Th, Ra, Rn,  $^{40}\text{K}$  и некоторых других. На основании результатов исследований содержания основных природных радионуклидов в почвах Украины были разработаны карты с указанием в ряде областей провинций с повышенной радиоактивностью почв, как правило, в местах выхода на поверхность подстилающих коренных пород — гранитов. Итоги этих работ обобщены в фундаментальной монографии Д. М. Гродзинского «Естественная радиоактивность растений и почв» [17], которая до последнего времени остается важнейшим источником данных о содержании природных радионуклидов в природной среде до периода промышленной добычи урана в Украине. Основоположник морской радиозологии Г. Г. Поликарпов с сотрудниками в Институте биологии южных морей АН УССР выполнили широкоплановые исследования по изучению содержания, миграции и биологического значения природных и искусственных радионуклидов в морях и Мировом океане. Результаты этих исследований обобщены в фундаментальной монографии Г. Г. По-

ликарпова «Радиоэкология морских организмов» [35] и получили дальнейшее развитие в коллективной монографии «Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию» [38].

С началом строительства АЭС в Украине заострилась актуальность радиоэкологических исследований пресноводных водоемов. К середине 1980-х гг. в бассейне Днепра были введены шесть АЭС с большими мощностями: на территории Украины — Запорожская, Ровенская, Хмельницкая, Чернобыльская и на территории России — Курская и Смоленская. На р. Южный Буг продолжала наращивать мощности Южно-Украинская АЭС. В Институте гидробиологии АН УССР были развернуты широкоплановые радиоэкологические исследования водоемов, испытывающих влияние АЭС. В результате исследований, выполненных гидробиологами-радиоэкологами на Киевском и других днепровских водохранилищах, р. Дунай в пределах Украины, а также в водоеме-охладителе ЧАЭС, были получены данные о содержании в воде, донных отложениях и гидробионтах продуктов деления урана ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134,137}\text{Cs}$  и др.) и радионуклидов коррозионного происхождения ( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др.). Результаты этих работ свидетельствовали, что, несмотря на строгий технологический контроль и высокоэффективную радиационную защиту, предусматривающие недопущение выброса радионуклидов, даже при нормальной работе АЭС некоторая часть радионуклидов поступает в природную среду. В составе нормированных содержатся газоаэрозольные выбросы и жидкие сбросы радионуклидов, поступающие с протечками в промышленных контурах из систем охлаждения конденсаторов турбин и с дебалансными водами. Среди широкого спектра радионуклидов, сбрасываемых в водоемы, наибольшую экологическую опасность представляют  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и радионуклиды плутония [1, 25, 26, 30, 34, 45, 49, 57, 61].

Даже в условиях засекреченности со временем становилось известно, что в разных странах на предприятиях с атомными технологиями происходили аварии. Приведем далеко не полный перечень аварий, сопровождавшихся выбросами радиоактивных веществ в природную среду [19, 29, 49, 50].

В 1957 г. в г. Кыштым, который находится на Южном Урале, на химкомбинате «Маяк» по производству и переработке ядерного топлива произошел взрыв хранилища радиоактивных отходов. Активность выброшенных отходов составляла  $74 \cdot 10^{16}$  Бк. Загрязнению основным дозообразующим радионуклидом  $^{90}\text{Sr}$  уровнем выше  $74 \text{ кБк/м}^2$  были подвергнуты территории Челябинской, Екатеринбургской и Тюменской областей общей площадью около  $23\,000 \text{ км}^2$ . В течение десятилетий радиоактивные отходы с химкомбината сбрасываются в недалеко расположенное оз. Карачай. Активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , накопленных в озере, превышает  $44,4 \cdot 10^{17}$  Бк. Под озером образовался подземный водоем с акваторией до  $10 \text{ км}^2$  и объемом около  $4 \text{ млн. м}^3$ . Под землей радиоактивные воды движутся со скоростью  $80 \text{ м в год}$ , что создает угрозу поступления радионуклидов в гидрографическую сеть.

В 1957 г. произошла авария в Уиндскейле (Селлафилд, Великобритания). В уран-графитовом реакторе для производства оружейного плутония из-за высокой температуры была нарушена кассета с ядерным топливом. Окисле-

ние урана и загорание графита повредило 150 топливных каналов. Через трубу реактора в атмосферу были выброшены радионуклиды, среди которых преобладали  $^{131}\text{I}$  —  $0,6 \cdot 10^{15}$  Бк и  $^{133}\text{Xe}$  —  $14 \cdot 10^{15}$  Бк.

В 1979 г. авария произошла на АЭС Три-Мейл-Айленд (США, штат Пенсильвания). В результате повреждений оборудования и ошибок оператора нарушились конструкции реактора и расплавилось 50% ядерного топлива. Из реактора было выброшено  $0,6 \cdot 10^{12}$  Бк радиоактивного йода и  $400 \cdot 10^{12}$  Бк  $^{85}\text{Kr}$ . Общая активность выброшенных в природную среду радионуклидов, преимущественно благородных газов, составила около  $10^{17}$  Бк.

Более чем убедительным примером уязвимости биосферы и особенно гидросферы нашей планеты в эпоху ядерных технологий являются радиозоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС — СССР, Украина), которая произошла 26 апреля 1986 г. В условиях безаварийной работы ЧАЭС существенно не влияла на радиозоэкологическую ситуацию вблизи расположенных водоёма-охладителя, р. Припяти и Киевского водохранилища, в воде которых активность радионуклидов преимущественно определялась глобальными выпадениями. Так, в 1979 г. в компонентах экосистемы Киевского водохранилища удельная активность радионуклидов составляла: в воде —  $^{90}\text{Sr}$  —  $0,008$ — $0,010$ ,  $^{137}\text{Cs}$  —  $0,001$ — $0,012$  Бк/л; в вышших водных растениях —  $^{90}\text{Sr}$  —  $9,3$ ,  $^{137}\text{Cs}$  —  $0,8$  Бк/кг; в моллюсках —  $^{90}\text{Sr}$  —  $1,3$ — $4,4$ ,  $^{137}\text{Cs}$  —  $0,2$ — $1,5$  Бк/кг [34]. В результате теплового взрыва была разрушена активная зона реактора РБМК-1000, который проработал около 300 сут и в нем было наработано около 2 т радионуклидов — продуктов деления урана, в том числе долгоживущих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ . В природную среду было выброшено около 200 радиоактивных изотопов суммарной активностью  $1,95 \cdot 10^{18}$  Бк, общая масса которых составляла около 70 кг. В разрушенном реакторе осталось около 180 т ядерного топлива, содержащего более  $7,4 \cdot 10^{17}$  Бк радиоактивных веществ.

Из разрушенного и пылающего ядерного реактора выбрасывались высокорadioактивные вещества с разными физико-химическими свойствами: газо-аэрозольная смесь, содержащая инертные радиоактивные газы (18 изотопов криптона и 15 изотопов ксенона),  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и разные субмикронные частицы с содержанием оксидов и карбидов некоторых металлов [21, 22, 46—48, 52]. Физико-химические свойства и состояние радионуклидов определяли их подвижность в природной среде. Высокорадиоактивные облака, содержащие смесь радиоактивных инертных газов,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и других радионуклидов, гонимые тропосферными ветрами, за две недели обогнув земной шар от Скандинавии и практически до экватора, осаждаясь на поверхность земли, сформировали радионуклидное загрязнение территорий СССР, Польши, Румынии, Финляндии, Швеции, Норвегии, Австрии, ФРГ, Англии, Италии, Турции, регистрировались в компонентах крупнейших рек Европы — Волге, Дунае и др. и определялись на акваториях Атлантического, Тихого и Северного ледовитого океанов [3, 23, 31, 32, 38, 58—61].

Ограниченная изолинией плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$   $37$  кБк/м<sup>2</sup> ( $1$  Ки/км<sup>2</sup>) составила более 200 тыс. км<sup>2</sup>, или 4% территории СССР. В отли-

чие от глобальных выпадений радиоактивных веществ при ядерных взрывах, в результате аварии на ЧАЭС были выбросы из реактора «горячих» частиц топлива. В топливной компоненте выброса содержались радионуклиды, связанные в урановой матрице, —  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  и примерно в равной пропорции три изотопа плутония —  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и другие радионуклиды. Мелкодисперсные частицы ядерного топлива с высоким содержанием радионуклидов плутония и в смеси с аэрозолями в виде густых и интенсивно излучающих масс осели вблизи разрушенного энергоблока и на всей ближней к ЧАЭС территории, образовав «плутониевое пятно» площадью около 790 км<sup>2</sup>. Наиболее загрязненная особенно биологически опасными радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240,241}\text{Pu}$  территория площадью около 2600 км<sup>2</sup> вокруг ЧАЭС была объявлена зоной отчуждения и зоной безусловного (обязательного) отселения населения. В зону отчуждения были включены многочисленные малые реки, нижний участок р. Припяти, пойменные водоёмы и верхняя часть Киевского водохранилища.

С первых дней после аварии на ЧАЭС и до последнего времени отделом пресноводной радиозоологии Института гидробиологии НАН Украины выполнялись многоплановые и целенаправленные исследования распределения и миграции широкого спектра радионуклидов аварийных выбросов и особенно  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в экосистемах водоёмов зоны отчуждения, крупнейших рек Европы — Днепре с притоками и водохранилищами, Волге, Дунае, Днестре, Южном Буге и рыбохозяйственных водоёмах Украины [14, 15, 20, 27]. Результаты этих исследований, полученные на основе триединого подхода к изучению удельной активности радионуклидов в компонентах экосистем, доз хронического ионизирующего излучения и его воздействия на жизнедеятельность гидробионтов, отражены в коллективных монографиях и раскрывают тяжёлые гидроэкологические последствия загрязнения водоёмов техногенными радионуклидами [15, 28 и др.].

В первые две недели после аварии на приустьевом участке р. Припяти уровень  $\beta$ -активности воды достигал  $1,0 \cdot 10^5$ — $3,7 \cdot 10^5$  Бк/л, из которых 70—90% всей активности приходилось на  $^{131}\text{I}$ . В этот период объёмная удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в припятской воде достигала  $15 \cdot 10^3$  Бк/л,  $^{239}\text{Pu}$  —  $3,7 \cdot 10^3$  Бк/л. В верхнем, 0—1 см, слое донных отложений водоема-охладителя удельная активность радионуклидов составляла:  $^{95}\text{Nb}$  —  $36,63 \cdot 10^5$ ,  $^{95}\text{Zr}$  —  $7,03 \cdot 10^6$ ,  $^{103}\text{Ru}$  —  $7,03 \cdot 10^5$ ,  $^{106}\text{Ru}$  —  $28,12 \cdot 10^5$ ,  $^{134}\text{Cs}$  —  $8,51 \cdot 10^4$ ,  $^{137}\text{Cs}$  —  $16,65 \cdot 10^4$ ,  $^{140}\text{Ba}$  —  $27,38 \cdot 10^5$ ,  $^{140}\text{La}$  —  $20,35 \cdot 10^5$ ,  $^{141}\text{Ce}$  —  $15,17 \cdot 10^6$ ,  $^{144}\text{Ce}$  —  $4,81 \cdot 10^6$  Бк/кг воздушно-сухой массы. В первые два года после аварии в воде водоема-охладителя объёмная удельная активность радионуклидов регистрировалась на уровне:  $^{90}\text{Sr}$  — 15,9—7,4,  $^{137}\text{Cs}$  — 70,3—32,2 Бк/л, в воде Припятского затона:  $^{90}\text{Sr}$  — 133,2—88,8,  $^{137}\text{Cs}$  — 25,2—9,6 Бк/л.

Днепр, его притоки и водохранилища на десятилетия стали основными путями транспорта радионуклидов с загрязнённых территорий в Чёрное море [13]. Ежегодный вынос  $^{90}\text{Sr}$  через пролив Босфор из Чёрного моря в Мраморное море происходил на уровне 1,6—1,9% от содержания этих радионуклидов в верхнем слое черноморской воды и за 1986—2000 гг. составил 110 ТБк  $^{90}\text{Sr}$  и 250 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  [48, 56]. Со скоростью, свойственной физико-химическим и метаболическим процессам в водных экосистемах, радионуклиды включались в миграцию в абиотических и биотических компонен-



тах и трофических цепях биогидроценозов. У рыб нижних трофических уровней (красноперка, толстолоб белый, белый амур) максимальные значения удельной активности депонированных радионуклидов регистрировались через 4—6 мес, у ихтиофагов (судак, щука, белизна и др.) — через 4—18 мес после аварии [14]. В мышечных тканях рыб водоёма-охладителя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  достигала: у густеры  $n \cdot 10^6$ , у канального сома —  $6,3 \cdot 10^5$  Бк/кг. В результате хронического внешнего и внутреннего облучения у гидробионтов разных систематических групп формировались радиационно-индуцируемые нарушения: высокий уровень хромосомного мутагенеза, процессы депрессии, нарушения межпопуляционных связей, появление стерильных особей и разнообразных уродств в популяциях рыб [28, 38, 39].

В природных условиях радиоактивные вещества постоянно подвергаются трансформации, вовлекаются в процессы распределения, миграции и транспорта в абиотических и биотических компонентах наземных и водных экосистем. Автореабилитация загрязненных радионуклидами экосистем осуществляется крайне медленно и главным образом определяется периодом полураспада наиболее долгоживущих радионуклидов, депонированных в донных отложениях, водной среде и гидробионтах. За прошедшие более четверти века после катастрофы в экосистемах водоемов Зоны отчуждения, Днепра, его притоков и водохранилищ сохранялась тенденция к снижению содержания как  $^{90}\text{Sr}$ , так и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях и организмах гидробионтов. Так, если в 1987 г. в воде водоёма-охладителя объёмная удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  составляла 7,4,  $^{137}\text{Cs}$  — 70,3 Бк/л, то к 2011 г. она соответственно снизилась до 0,30 и 0,4 Бк/л. Наряду с этим в оз. Глубоком, которое расположено на расстоянии 6,5 км от ЧАЭС на интенсивно загрязненной радионуклидами левобережной пойме р. Припяти, объёмная удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  до последнего времени сохраняется на достаточно высоком уровне (табл. 1).

До 2003 г. в Киевском водохранилище сохранялось превышение доаварийных уровней содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях, моллюсках и рыбах, а у отдельных особей рыб до последнего времени удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  регистрируется в пределах 165—220 Бк/кг [14]<sup>1</sup>. Результаты многочисленных разноплановых радиозоологических исследований и глубокие монографические обобщения, учитывающие специфику объектов внешней среды, обусловили выделение радиозологии наземных биогеоценозов и радиозологию биогидроценозов — морскую и пресноводную радиозологию [28, 35, 38].

В апреле 2011 г. произошла авария на расположенной на морском побережье АЭС с четырьмя ядерными блоками «Фукусима-1» (Япония). После землетрясения и последовавшего за ним цунами вышла из строя система охлаждения и произошла серия аварий. В результате повреждения реакторов 1, 2, 3 и разрушения помещений с отработанным ядерным топливом в природную среду было выброшено  $^{131}\text{I}$  —  $153 \cdot 10^{15}$  и  $^{137}\text{Cs}$  —  $12,5 \cdot 10^{15}$  Бк, а также скопилось более 105 тыс. т воды, содержащей радионуклиды общей актив-

<sup>1</sup> Допустимые уровни содержания радионуклидов в рыбной продукции (2006 г.):  $^{90}\text{Sr}$  — 35 Бк/кг;  $^{137}\text{Cs}$  — 150 Бк/кг.

**1. Объёмная удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/л) в воде водоёмов 10-км зоны после аварии на Чернобыльская АЭС**

Водоёмы	Расстояние от ЧАЭС, км	1990—1991 гг. [13]		2007—2011 гг.*	
		$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$
Водоём-охладитель ЧАЭС		8,5—7,0	12,2—8,1	0,33—0,30	1,0—0,4
Оз. Азбучин	2,0	222—148	18,5—11,1	22—14	8,1—1,1
Оз. Глубокое	6,5	370—222	740—370	70—38	4,7—2,3
Оз. Вершина	~ 5,0	296—222	370—296	200—70	2,6—1,3

\* По данным А. Е. Кагляна.

ностью около  $720 \cdot 10^{15}$  Бк. В районе АЭС «Фукусима-1» мощность экспозиционной дозы увеличилась до сотен микрозивертов в час и в тысячи раз превысила природный радиоактивный фон. Территория в 13 000 км<sup>2</sup> была подвергнута радионуклидному загрязнению плотностью более  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк (1 Ку)/км<sup>2</sup>.

По состоянию на начало 2013 г. в 31 стране мира эксплуатировалось 185 АЭС, оснащенных 437 ядерными энергоблоками общей установленной мощностью 372,4 ГВт; строились еще 64 энергоблока<sup>2</sup>. Ядерный топливный цикл состоит из технологических звеньев: добычи и переработки урановых руд, изготовления ядерного топлива, использования ядерного топлива в ядерных реакторах, регенерации отработанного топлива, хранения радиоактивных отходов и отработанных материалов. Во всех звеньях ядерного топливного цикла содержатся разной степени потенциальные риски для биосферы. Следует подчеркнуть, что в активной зоне ядерных реакторов происходит деление тяжелых ядер, активация нейтронами различных материалов и образуется большое количество радионуклидов. Активность облучённого топлива в 107—108 раз превышает активность необлучённого [25]. Как свидетельствуют аварии на предприятиях с ядерными технологиями, и особенно аварии на ЧАЭС и «Фукусима-1», в природную среду выбрасывается огромное количество искусственных, в том числе с длительным периодом полураспада, радионуклидов, ранее не содержащихся в биосфере и создающих опасность для биосферы. Катастрофы на ЧАЭС и «Фукусима-1» стали нелегким испытанием доверия человечества к атомной энергетике. Во многих странах мира планы развития атомной энергетики претерпели существенные изменения, и в ряде стран (Германия и др.) были приняты решения в перспективе отказаться от эксплуатации АЭС.

***Арсеналы ядерных вооружений — потенциальная опасность для биосферы***

Вторая половина XX в. ознаменовалась гонкой ядерных вооружений и в наиболее промышленно развитых странах мира — Англии, США, СССР,

<sup>2</sup> www.iaea.org.



**2. Средняя объемная удельная активность  $^{239, 240}\text{Pu}$  в поверхностном слое воды различных акваторий Земного шара [60]**

Акватории	$^{239, 240}\text{Pu}$ , мБк/м <sup>3</sup> ± 1σ
Северная часть Тихого океана	3,3 ± 2,8
Экваториальная часть Тихого океана	3,1 ± 0,7
Южная часть Тихого океана	2,8 ± 2,1
Японское море	6,6 ± 2,5
Аравийское море	1,9 ± 1,2
Индийский океан	3,0 ± 1,2
Южный океан	1,0 ± 0,5
Арктика	6,4 ± 1,5
Баренцево море	20 ± 12
Балтийское море	3,4 ± 2,5
Северное море	15 ± 10
Ирландское море	500 ± 400
Английский канал	13 ± 8
Север Северной Атлантики	36 ± 16
Черное море	5,3 ± 2,3
Средиземное море	14 ± 4
Северная часть Атлантического океана	5 ± 3
Центральная часть Атлантического океана	2,8 ± 1,3
Южная часть Атлантического океана	1,8 ± 0,6

Франции были накоплены колоссальные запасы ядерного оружия. Общая мощность атомных бомб, испытанных в атмосфере, составила 629 Мт. Радиоактивные продукты ядерных взрывов, содержащие долгоживущие радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  поднимались в атмосферу, разносились на огромные расстояния и в течение 1—2 лет постепенно осаждались, загрязняли поверхность Земли, Мирового океана и накапливались в компонентах биосферы. Максимальный уровень глобальных радиоактивных выпадений был отмечен в 1963 г. и достиг 10% среднего естественного радиоактивного фона.

После подписания международных договоров о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой (1963 г.) и нераспространении ядерного оружия (1968 г.) гонка вооружений массового поражения была приостановлена. Однако с годами ядерным оружием овладели Китай, Индия, Пакистан, Израиль и Северная Корея [24]. Суммарный запас ядерного оружия в странах мира достигает  $(16—18) \cdot 10^9$  т, что в расчете на каждого жителя планеты составляет более 3,5 т в тротиловом эквиваленте. На планете Земля остались непригодные для постоянного

проживания человека испытательные ядерные полигоны: Семипалатинский (СССР, Казахстан), на архипелаге Новая Земля (СССР, Россия), в штате Невада (США) и др. Производство и испытания ядерных вооружений, наращивание мощностей атомной энергетики привели к тотальному распространению на поверхности Земли и в Мировом океане искусственных радионуклидов с длительным периодом полураспада, среди которых наибольшую экологическую опасность представляют  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и радионуклиды плутония (табл. 2) [55].

Исследователями Англии, России, Канады, США были смоделированы разные сценарии последствий ядерной войны для биосферы, которые убедительно показали, что в ядерной войне разрушительные и огненные штормы резко изменяют состав атмосферы и климат Земли, уничтожат растительный и животный мир, приведут к деградации биосферы и гибели цивилизации. Для недопущения ядерной катастрофы и гибели биосферы наиболее радикальной была бы ликвидация всех видов вооружений массового поражения, недопущение малейшей возможности ядерной войны, в которой не будет ни победителей, ни побежденных. Катастрофы на ЧАЭС и «Фукусима-1» должны быть глубоко осмыслены международным сообществом, перед которым стоят потенциальные и реально существующие проблемы в области глобальной гидроэкологической и ядерной безопасности [36, 37, 43]. И вопрос, поставленный В. И. Вернадским в 1911 г. относительно использования атомной энергии — «сможет ли человечество воспользоваться этой силой, направив ее на добро, а не на самоуничтожение?» — и в наши дни остается одним из главных проблемных вопросов, стоящих перед человечеством.

### *Заключение*

Вершиной научного творчества гениального ученого, мыслителя и организатора науки В. И. Вернадского, без сомнения, является учение о природных водах, живом веществе, биосфере и её эволюционном переходе в ноосферу, составляющее основу современного научного мировоззрения. Выполненные В. И. Вернадским в первой половине XX ст. радиогеологические и биогеохимические исследования природной радиоактивности положили начало развитию радиоэкологии, задачи которой в эпоху ядерных технологий приобрели глобальную актуальность.

Многие отрасли жизни и деятельность современной цивилизации невозможно представить без использования радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений, которые нашли широкое применение в науке, медицине, космической технике и, особенно, в атомной энергетике. Распространение ядерных технологий, эксплуатация предприятий ядерно-топливного цикла, аварии на объектах с использованием ядерных технологий сопровождаются прогрессирующим загрязнением биосферы долгоживущими искусственными радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и радионуклидами плутония. Прогрессирующее химическое и радионуклидное загрязнение биосферы заостряет актуальность гидроэкологических и радиоэкологических исследований природных вод, используемых в больших объемах в технологических циклах современной промышленности, и в частности атомного производства.

С обострением гидроэкологических проблем изменились и взгляды на гидроэкологическую и радиозэкологическую безопасность, произошла переориентация приоритетов от изучения жизнедеятельности отдельных организмов и популяций видов к исследованиям абиотических и биотических процессов на уровне экосистем [41, 42, 44]. Становление гидроэкологии в свою очередь способствовало дальнейшему развитию радиозэкологических исследований водоемов на экосистемном уровне, основными задачами которых стали: изучение распределения и миграции радионуклидов в водных экосистемах и их воздействия на гидробионтов; экологическое восстановление водных экосистем после радионуклидного загрязнения; разработка технологических решений защиты источников питьевого водоснабжения, орошаемых земель и ресурсов водоемов от химического и радионуклидного загрязнения; разработка и реализация глобальной системы мониторинга биогидросферы, включающего формирование банка данных, прогнозирование и разработку оптимальных решений региональных и глобальных проблем; изучение последствий аварий и разработка научных принципов гидроэкологической безопасности в эпоху развития ядерных технологий.

\*\*

*В. И. Вернадський вперше застосував біогеохімічний метод для вивчення природної радіоактивності, виконав радіогеологічні дослідження і встановив роль радіоактивних елементів у біогідросфері. Результати цих робіт мали велике значення для вирішення завдань, пов'язаних з пошуком уранових руд. Широке розповсюдження ядерних технологій, атомної зброї зумовило актуальність радіоекологічних досліджень біосфери.*

\*\*

*V. I. Vernadskiy was the first to use the biogeochemical method in studies of natural radioactivity. The role of radioactive elements in the biohydrosphere was revealed as a result of radiogeological investigations performed by this scientist. Results of these studies were of considerable importance in the solution of the problems dealt with the search of uranium ores. The use of nuclear technologies, the development of nuclear power engineering, and the test of nuclear weapon resulted in the increase in the intensity of radioecological studies of the biosphere.*

\*\*

1. Багяев В.В., Егоров Ю.А., Казаков С.В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 224 с.
2. Бутько М.И. Эволюция биосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 488 с.
3. Вакуловский С.М., Катрич В.М., Краснопевцев Ю.В. и др. О загрязнении Атлантического океана и его морей радиоактивными продуктами // Океанология. — 1981. — Т. 21, вып. 2 — С. 257—265.
4. Вернадский В.И. История минералов земной коры. — Петроград, 1923. — Т. 1, вып. 1. — 376 с.
5. Вернадский В.И. История минералов земной коры. — Л.: Науч. хим.-тех. изд-во, 1927. — Т. 1, вып. 2. — 370 с.
6. Вернадский В.И. История минералов земной коры. История природных вод. — Л.: Госхимтехиздат, 1933. — Т. 2, вып. 1. — 202 с.
7. Вернадский В.И. История минералов земной коры. История природных вод. — Л.: ОНТИ, Химтеорет, 1936. — Т. 2, вып. 3. — С. 403—562.

8. *Вернадский В.И.* Размышления натуралиста. Научная мысль как планетное явление. — М.: Наука, 1977. — 192 с.
9. *Вернадский В.И.* Живое вещество. — М.: Наука, 1978. — 358 с.
10. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. — М.: Наука, 1987. — 338 с.
11. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. — М.: Наука, 1989. — 262 с.
12. *Виноградов А.П.* Введение в геохимию океана. — М.: Наука, 1967. — 212 с.
13. *Войцехович О.В.* Радиозкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Т. 1. Мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод Украины (обзор исследований, выполненных за период 1986—1996 гг.). — Киев: Чернобыльинтеринформ, 1997. — 308 с.
14. *Волкова О.М.* Техногенні радіонукліди у гідробіонтах водойм різного типу: Автореф. дис. ... докт. біол. наук. — К., 2008. — 34 с.
15. *Гидроэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС* / Отв. ред. Д. М. Гродзинский — Киев: Наук. думка, 1992. — 267 с.
16. *Григорьев Ю.Г.* Космическая радиобиология. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 75 с.
17. *Гродзинский Д.М.* Естественная радиоактивность растений и почв. — Киев: Наук. думка, 1965. — 250 с.
18. *Громов В.В., Спицин В.И.* Искусственные радионуклиды в морской среде. — М.: Атомиздат, 1975. — 223 с.
19. *Гудков І.М., Гайченко В.А., Кашпаров В.О. та ін.* Радіоекологія. Навчальний посібник. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. — К., 2011 — 368 с.
20. *Гудков Д.И., Деревец В.В., Зуб Л.Н. и др.* Распределение радионуклидов по основным компонентам озерных экосистем зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиозкология. — 2005. — Т. 45, № 3. — С. 271—281.
21. *Израэль Ю.А.* Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 296 с.
22. *Израэль Ю.А., Петров В.Н., Авдюшин С.И. и др.* Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной станции // Метеорология и гидрология. — 1987. — № 2. — С. 5—18.
23. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 528 с.
24. *Кайл Ш., Федченко В., Гопаласвами Б., Кристенсен Х. І.* Світові ядерні сили // Armaments, Disarmament and International Security. Stockholm international peace research institute. — Oxford: Oxford university press, 2011. — P. 298—327.
25. *Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сигоренко В.Д.* Радиоактивные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 209 с.
26. *Котельников В.П., Маркелов В.Н., Нелепо Б.А.* Новые данные о радиоактивности атмосферы и плотности выпадений в бассейне Черного моря // Атом. энергия . — 1965. — № 5. — С. 421—423.
27. *Кузьменко М.И.* Радиозкологические проблемы водоемов Украины // Гидробиол. журн. — 1998. — Т. 34, № 6. — С. 95—119.

28. Кузьменко М.І., Гудков Д.І., Кірєєв С.І. та ін. Техногенні радіонукліди в прісноводних екосистемах. — К.: Наук. думка, 2010. — 262 с.
29. Кутлахмегов Ю.О., Корогогін В.І., Кольтовер В.К. Основы радіоекології. Навчальний посібник. — К.: Вища шк., 2003. — 319 с.
30. Лавренчик В.Н. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов. — М.: Атомиздат, 1965. — 170 с.
31. Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И. и др. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений 1985—1987 гг. // Атом. энергия. — 1991. — Т. 71, вып. 2. — С. 169—172.
32. Никитин А.И., Мединец В.И., Чумичев В.Б. Радиоактивное загрязнение морей, омывающих территорию СССР продуктами аварии на ЧАЭС // Радиационные аспекты Чернобыльской аварии, Т. 1. Радиоактивное загрязнение природных сред. — Л.: Гидрометеоздат, 1993. — С. 381—387.
33. Озима М.Г. Глобальная эволюция Земли. — М.: Мир, 1990. — 166 с.
34. Паньков И.В., Волкова Е.Н., Широкая З.О. Радиозэкологические исследования в зоне литорали Киевского водохранилища до и после аварии на Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. — 1993. — Т. 29, № 3. — С. 100—109.
35. Поликарпов Г.Г. Радиозэкология морских организмов. — М.: Атомиздат, 1964. — 296 с.
36. Поликарпов Г.Г. Радиационная защита биосферы, включая *Homo sapiens*: выбор принципов и поиски решения // Мор. экол. журн. — 2006. — Т. 5, № 1. — С. 16—34.
37. Поликарпов Г.Г. Радиационная защита как научная основа радиационной защиты биосферы и человечества // Проблемы радиозэкологии и пограничных дисциплин. — Екатеринбург: ИЭРЖ УрО РАН, 2006. — Вып. 8. — С. 3—28.
38. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. и др. Радиозэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию. — Севастополь: НПС «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. — 667 с.
39. Поликарпов Г.Г., Цыцугина В.Г., Жерко Н.В., Баранова О.К. Цитогенетические эффекты в популяциях олигохет *Stylaria lacustris* в «пятнах» радиоактивного и химического загрязнения // Докл. АН Украины. — 1992. — № 4. — С. 147—150 .
40. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиозэкология после Чернобыля // Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. — М.: Мир, 1999. — 511 с.
41. Романенко В.Д. Основы гідроекології.: Підручник. — К.: Обереги, 2001. — 728 с.
42. Романенко В.Д. Основы гидрозэкологии: Учебник для студентов высших учебных заведений. — Киев: Генеза, 2004. — 664 с.
43. Романенко В.Д., Кузьменко М.І., Афанасьєв С.О. та ін. Гідроекологічна безпека атомної енергетики в Україні // Вісн. НАН України. — 2012. — № 6. — С. 41—51.
44. Романенко О.В., Костильов О.В. Основы екології: Навчальний посібник. — К.: Фітосоціоцентр, 2001. — 150 с.

45. *Серега Г.А.* Загрязненность морей и океанов искусственными радиоактивными веществами // Вопросы ядерной метеорологии / Под ред. И. Л. Кароль и С. Г. Малахова. — М.: Госатомиздат, 1962. — С. 259—271.
46. *Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В. и др.* Геохимия техногенных радионуклидов. — Киев: Наук. думка, 2002. — 332 с.
47. *Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Ольхович Ю.А.* Радиогеохимия в зоне влияния Чернобыльской АЭС / Отв. ред. Э. В. Соботович. — Киев: Наук. думка, 1992. — 344 с.
48. *Стокозов Н.А.* Долгоживущие радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Черном море после аварии на Чернобыльской АЭС и их использование в качестве трассеров процессов водообмена: Дис. ... канд. геогр. наук. — Севастополь, 2004. — 193 с.
49. *Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Трапезникова В.Н.* Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Т. 1. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — 480 с.
50. *Трапезников А.В., Трапезникова В.Н.* Радиоэкология пресноводных экосистем. — Екатеринбург: УрО РАН, 2006. — 390 с.
51. *Холл Э.Дж.* Радиация и жизнь. — М.: Медицина, 1989. — 256 с.
52. *Чернобыльская катастрофа* / Под ред. В. Г. Барьяхтара. — Киев: Наук. думка, 1995. — 473 с.
53. *Шварц С.С.* Экологические закономерности эволюции. — М.: Наука, 1980. — 277 с.
54. *Яншина Ф.Т.* Эволюция взглядов В. И. Вернадского на биосферу и развитие учения о ноосфере. — М.: Наука, 1996. — 222 с.
55. *Voice J.D.* Studies of Atomic Bomb Survivors: Understanding the Radiation Effects // J. American Medical Association. — 1990. — Vol. 264, N 5. — P. 622—623.
56. *Egorov V.N., Povinec P.P., Polikarpov G.G. et al.*  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident inventories, balance and tracer applications // J. Environ. Radioactivity. — 1999. — Vol. 43, N 2 — P. 137—155.
57. *Hardy E.P., Krey P.W., Nolchor H.L.* Global Inventory and Distribution of Fallout Plutonium // Nature. — 1973. — Vol. 241, N 5390. — P. 444—445.
58. *Summary Report on the Post — Accident Review Meeting after the Chernobyl Accident.* Safety Series. — Vienna IAEA, 1986. — N 75. — INSAG — 1. — 537 p.
59. *Survey A., Nyffeler F., Cigna A.A. et al.* Radionuclides in the Atlantic Oceans: Inputs and Inventories. — IPSN, Editions de Physique, 1996. — 244 p.
60. *Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide Levels in Oceans and Seas.* — Vienna: IAEA, 2005. — 1287 p.
61. *Yamada M., Aono T., Hirano S.*  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in fish, cephalopods, crustaceans, shellfish and algae collected around the Japanese coast in the early 1990s // The Science of the Total Environment. — 1999. — Vol. 239. — P. 131—142.