ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОУГЛЕРОДА В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Чеботина М.Я., Пономарева Р.П. – Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В работе приводятся результаты собственных экспериментальных исследований и данных других авторов о накоплении ^{14}C наземными растениями и пресноводными гидробионтами, поступлении его с рационом в организм животных и человека, а также о распределении этого радионуклида в компонентах окружающей среды в районах размещения предприятий ЯТЦ.

PECULIARITIES OF RADIOCARBON ACCUMULATION IN ENVIRONMENTAL COMPONENTS

Chebotina M.Ja., Ponomareva R.P. – Institute of Plant and Animal Ecology UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The authors report on the results of their experiments and those obtained by other authors on the accumulation of ^{14}C in aboveground plants and freshwater hydrobionts, its entry with diet into animal and human organisms, its distribution in environmental components in the regions of nuclear power enterprises.

Углерод-14 (^{14}C) – долгоживущий изотоп с периодом полураспада 5730 лет. В природных условиях он образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием космического излучения. Радиоуглерод техногенного происхождения поступает в атмосферу при испытаниях ядерного оружия («бомбовый углерод») и при работе предприятий ядерно-топливного цикла. Расчетные данные и прогноз их содержания в биосфере Земли относительно уровня естественного фона приведен на рис. 1.

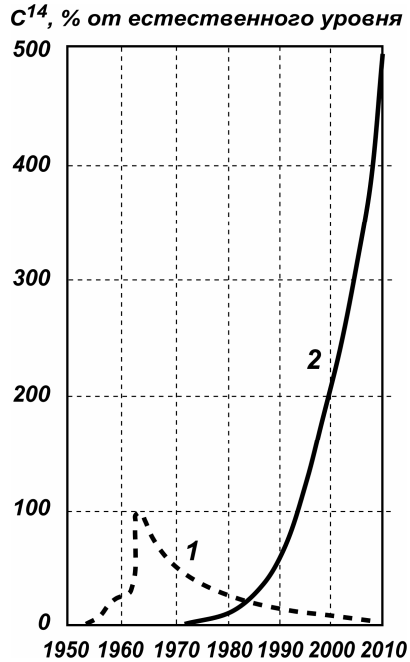

Рис. 1. Изменение содержания радиоуглерода бомбового (1) и реакторного (2) происхождения в биосфере Земли относительно уровня естественного фона [18]

В период испытаний ядерного оружия надфоновые концентрации углерода-14 обнаруживались не только в тропосфере, но и в организме людей (Грейб, цит. по [17]). В настоящее время основной вклад в загрязнение атмосферы техногенным радиоуглеродом вносят заводы по регенерации отработанных ТВЭЛов. Углерод-14 поступает в атмосферный воздух в форме $^{14}CO_2$ (70-95 %), ^{14}CO (25-30 %) и углеводородов (0–25 %). Кроме того, он попадает в природную среду также с жидкими стоками в виде карбонатов и ионов угольной кислоты. Считается, что от современных предприятий атомной промышленности в атмосферу поступает 0,01–1 ТБк ^{14}C в сутки [1, 3–10].

В экосистемах Земли углерод-14 включается в те же процессы, что и его стабильный аналог – углерод-12. Последний является одним из наиболее широко распространенных элементов в биосфере Земли и входит в структурную основу практически всех организмов на планете.

Радиоуглерод в растениях

Растения поглощают углерод из углекислого газа атмосферы. Ежегодно в процессах фотосинтеза они связывают от 6 до 7 % углекислого газа атмосферы Земли и поверхностных вод озер, морей, океанов.

Около 2/3 ассимилированного углерода используется растениями на создание биомассы, 1/3 – на дыхание и 1/1000 выбывает из круговорота в результате процессов торфо- и гумусообразования. Для создания биомассы радиоуглерод поглощается растениями из воздуха (62–81 % в результате фотосинтеза и ~ 9 % за счет гетеротрофной темновой фиксации) и из почвы через корневую систему (от 9 до 29 %) [17].

Газообмен между клетками листа растений и воздухом происходит в результате диффузии CO_2 через открытые устьица. В природных условиях растения способны связывать до 80 мг CO_2 на 1 дм^2 листовой поверхности в течение одного часа. Особенно высокой интенсивностью фотосинтеза обладают синезеленые водоросли, кукуруза, некоторые виды проса и многие злостные сорняки (500 видов растений из 13 семейств). Последние способны усваивать до 30 раз больше CO_2 , чем такие растения, как мхи, лишайники, водоросли и в 2 раза больше, чем большинство сельскохозяйственных растений. Очень слабая продуктивность отмечена у планктонных и укорененных водорослей. Частично это объясняется плохим снабжением их углекислотой. Хотя пресная вода содержит примерно в 160 раз больше углекислоты, чем воздух, в воде CO_2 передвигается к листьям примерно в 10^4 раз более медленно, чем в воздухе.

Травянистые растения, при прочих равных условиях, поглощают CO_2 вдвое более интенсивно, чем лиственные деревья и в 5 раз интенсивнее, чем хвойные. У одного и того же растения молодые органы дышат более интенсивно, чем заканчивающие свой рост [4]. В молодом возрасте растения используют избыток ассимилянтов на формирование ассимиляционного потенциала (площади листовой поверхности), а с переходом к процессам плодоношения – на формирование генеративных и запасающих органов. В полевых условиях установлено, что в возрасте от 15 до 30 суток в листьях растений бобов, пшеницы, картофеля после часовой экспозиции их в атмосфере $^{14}CO_2$ остается от 40 до 60 % фотоассимилянтов, а в возрасте 60–70 суток – 10–30 %; остальной радиоуглерод поступает в запасающие органы.

Суточный баланс углерода будет положительным в том случае, если в течение дня обеспечивается благоприятное для фотосинтеза сочетание экологических факторов (свет, температура, влага, условия минерального питания). Прирост органического вещества (или чистая продукция фотосинтеза) зависит также от фазы развития растений и неодинакова по величине в течение периода вегетации.

Установлено, что интенсивность газообмена посевов различных сельскохозяйственных культур на площади 1 га различается на порядок величин в зависимости от вида этих культур (пшеница > картофель > бобы) и происходит в них более интенсивно, чем в лиственном лесу.

Начальным звеном – поставщиком радиоуглерода в компонены природной среды, являются выбросы локального источника в атмосферный воздух. Рассчитано, что в условиях лесостепной зоны на площади 100 км^2 при интенсивности выброса радиоуглерода 37 ГБк/сут и высоте трубы 100 м растительностью ассимилируется ~ 3 % газового выброса ^{14}C.

Для того чтобы исследовать поведение радиоуглерода в системе атмосферный воздух – растение – почва в различных растительных сообществах обычно применяют ^{14}C как метку. При этом $^{14}CO_2$ вводят в камеры, устанавливаемые на посевах сельскохозяйственных культур и в естественных угодьях. Эти опыты важны в том плане, что естественные травы являются одним из основных передаточных звеньев радионуклида от животных к человеку, а овощные и зерновые культуры являются растительными компонентами рациона человека. Во время нахождения растений в камере до 98 % от содержащегося там радионуклида в виде $^{14}CO_2$ поглощается растениями. Для характеристики уровней накопления радиоуглерода в различных органах и тканях растений по сравнению с содержанием его стабильного аналога используют величину удельной активности

углерода – УАУ (Бк ^{14}C / г ^{12}C). Показано, что уже через 2 часа после начала экспозиции растений в атмосфере $^{14}CO_2$ наступает состояние, близкое к равновесию. При этом концентрация радиоуглерода в воздухе и растениях стабилизируется, но выравнивания значений удельной активности в различных органах не происходит. Эти различия в значениях УАУ для разных органов растений после 5-суточной экспозиции их в атмосфере $^{14}CO_2$ достигали порядка величин, например, для листьев вейника величина УАУ составила $0{,}9 \cdot 10^4$ Бк на г С, а для стебля этого растения – в 9–10 раз больше. При этом в листьях разных видов растений значения УАУ различались в 15 раз, а в пределах одного вида – в 2,5 раза (табл. 1).

Поступление ^{14}C в растения после экспозиции их в атмосфере $^{14}CO_2$ зависит от водного режима почвы. Например, у растений семейства злаковых суходольного луга удельная активность углерода в 1,5–2 раза ниже, а у семейства бобовых, розоцветных и гераниевых – во столько же раз выше, чем у соответствующих растений суходольного луга (табл. 2). Таким образом, растения суходольного луга, где до 70 % составляет разнотравье, более интенсивно ассимилируют углекислоту, чем растения низинного луга.

После прекращения подачи радиоуглерода растениям этот изотоп в течение 5–8 суток интенсивно выделяется в воздух, поэтому его содержание в растениях снижается, а в окружающем травостое возрастет. Увеличивается также его содержание в почве на экспериментальных участках, что очевидно объясняется фиксацией радионуклида из воздуха микроорганизмами-автотрофами, выделением его в почву корнями растений и минерализацией органических остатков. Поступивший в почву радоуглерод активно включается в биологический круговорот. На второй год после введения в растения он обнаруживается в корнях и надземной массе разнотравья, появившегося в новом вегетационном сезоне. При этом прослеживается существенная (в радиусе до 150-200 м) миграция радионуклида от места первичного загрязнения.

Таблица 1. Удельная активность углерода-14 в различный органах дикорастущих растений после экспозиции их в камере с радиоуглеродом

Вид (семейство)	Удельная активность, $n \cdot 10^4$ Бк ^{14}C / г ^{12}C			
	Листья	Стебли	Цветы	Семена
Вейник незаметный (злаковые)	0,9	8,4	-	-
Лисохвост вздутый (злаковые)	1,00	-	-	-
Василистник простой (лютиковые)	1,10	1,16	1,10	1,06
Тигунец сомнительный (зонтичные)	1,10	-	-	-
Рогоз узколистный (рогозовые)	1,2	-	-	-
Герань лесная (гераниевые)	1,7	8,00	6,10	-
Лапчатка прямостоячая (розоцветные)	2,86	-	-	-
Осока дернистая (осоковые)	3,20	-	-	-
Будра ягощевидная	4,8			
Пырей ползучий (злаковые)	5,00			
Осот полевой (сложноцветные)	6,40	4,66	-	-
Чина луговая (бобовые)	6,90	7,10	-	5,00
Подмаренник северный (мареновые)	7,40	2,00	-	-
Вика мышиный горошек (бобовые)	12,00	9,80	2,40	3,00
Лапчатка гусиная лапка (розоцветные)	14,00	14,00	-	-

Таблица 2. Удельная активность углерода-14 в растениях низинного и суходольного луга после их экспозиции в камере с радиоуглеродом, $n \cdot 10^4$ Бк ^{14}C / г ^{12}C

Вид растений	Тип луга	
	низинный	суходольный
Вика мышиный горошек	6,2	14,5
Подмаренник северный	7,4	13,0
Осот полевой	6,4	9,6
Лапчатка прямостоячая	2,8	8,0
Герань лесная	1,7	6,0
Мятлик узколистный	6,0	2,6
Пырей ползучий	5,2	1,8

Исследования показали, что в растительных компонентах рациона сельскохозяйственных животных, таких как сено, посыпка (зерно пшеницы, ячменя, кукурузы) происходит концентрирование ^{14}C по сравнению с содержанием его в воздухе. Об этом свидетельствуют данные табл. 3, где приведены коэффициенты концентрирования этого радионуклида в компонентах растений относительно воздуха через 5 месяцев после однократной экспозиции их в атмосфере радиоуглерода. Видно, что для разных видов сельскохозяйственной продукции эти коэффициенты варьируют в пределах 1600–8000 единиц.

Поступление радиоуглерода с рационом к человеку в условиях действия постоянного источника выброса

Поступление ^{14}C к человеку в условиях постоянного поступления в окружающую среду от предприятий ядерно-топливного цикла рассчитано для жителей г. Озерска, расположенного в районе ПО «Маяк». При расчетах к основным компонентам рациона были отнесены хлебопродукты, молочные продукты, картофель, мясо [3]. При этом сделано допущение, что все продукты – местного производства, хотя на самом деле определенная часть продуктов поступает из других регионов страны, например, хлебопродукты. Из табл. 4 видно, что концентрация ^{14}C в разных продуктах питания изменяется в пределах от 81 до 950 Бк/кг, а в воде она составляет всего 0,3 Бк/л. Среди указанных выше продуктов питания больше всего радиоуглерода содержится в зерне пшеницы (950 Бк/кг).

Поступление ^{14}C с рационом к человеку происходит в основном за счет употребления хлеба (152 кБк/год), что составляет примерно 75 % от всего рациона. Для детей поступление ^{14}C с хлебом также преобладает (~ 50 %) за счет высокого содержа-

Таблица 3. Коэффициенты концентрирования (*) радиоуглерода в продуктах рациона животных относительно воздуха

Звено	Коэффициент накопления, Бк/кг продукта / Бк/кг воздуха
Воздух-зеленая масса растений (естественные травы)	930
Воздух-клубни картофеля	1580
Воздух-корнеплод свеклы	1440
Воздух-зерно пшеницы	8000

* Здесь и в дальнейшем результаты по углероду приводятся в расчете на сырую массу продукции

Таблица 4. Концентрация радиоуглерода в продуктах рациона и приземном слое воздуха

Компонент рациона	Единицы измерения	Концентрация
Мясо	Бк/кг	155
Молоко	Бк/л	81
Творог	Бк/кг	114
Рыба (сырок, окунь)	"	146
Зерно пшеницы	"	950
Картофель	"	189
Зеленая масса естественных трав	"	110
Вода	Бк/ л	0,3
Воздух	Бк/л Бк/кг	$2 \cdot 10^{-4}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$

ния радиоуглерода в зерне, однако поскольку их рацион состоит преимущественно из молочных продуктов, значительная часть радиоуглерода (~ 20 %) поступает с этими продуктами (табл. 5).

Поступление радиоуглерода к человеку регламентируется нормами радиационной безопасности. Согласно НРБ-99 [14], эта величина составляет $6{,}3 \cdot 10^5$ Бк/год. Для жителей г. Озерска она составляет примерно 32 % от принятого норматива. Если учесть, что определенная часть продуктов – не местного производства, эта величина будет ниже.

Аналогичные значения величины годового поступления радиоуглерода в организм человека получены [22], для территории, расположенной вблизи радиохимического завода, работающего без очистки воздушных выбросов предприятия от ^{14}C (от $1{,}5 \cdot 10^5$ до $2{,}4 \cdot 10^5$ Бк/год).

Концентрация ^{14}C в приземном слое воздуха района расположения ПО «Маяк» в 1981 г. составляла $2 \cdot 10^{-4}$ Бк/л или $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Бк/кг, что равно ~ 4 % от допустимой концентрации радионуклида согласно принятому нормативу [13].

Таблица 5. Поступление радиоуглерода с рационом к человеку в условиях действия локального источника выброса

Продукты	Взрослые		Дети до 10 лет	
	Потребление, кг	Поступление, $n \cdot 10^3$ кБк/год	Потребление, кг	Поступление, $n \cdot 10^3$ кБк/год
Хлебопродукты	160	152,0	48	45,6
Молочные продукты	120	10,8	215	20,1
Картофель	135	24,5	55	10,4
Овощи	69	4,7	36	2,5
Мясо	39	10,7	36	5,6
Вода	584	0,2	-	-
Итого	523	202,9	389	84,2

Индикация загрязнения радиоуглеродом природной среды в районах расположения предприятий ЯТЦ

А). Наземные экосистемы. При систематическом поступлении повышенных концентраций радиоуглерода в воздушную среду он накапливается в растениях в концентрациях, превышающих уровень естественного фона (0,23 Бк ^{14}C / г ^{12}C). Например, исследования содержания ^{14}C в годовых кольцах березы на расстоянии 4 км от Северского химического комбината с 1937 по 1984 гг. показало, что на первом этапе исследований содержание радионуклида в растениях находилось на уровне естественного фона, а затем повысилось за счет взрывов ядерных устройств и газовых выбросов предприятия [15]:

Годы	Удельная активность углерода, Бк ^{14}C / г ^{12}C
1937-1943	0,24
1944-1950	0,54
1951-1956	0,43
1957-1964	0,36
1965-1971	0,45
1972-1978	0,50
1979-1984	0,60

В этом же районе содержание радиоуглерода в кольцах сосны в период с 1949 по 1952 гг. было близко к уровню естественного фона, а с середины 50-х годов оно возросло примерно на 75 %. По данным ряда авторов относительное содержание радиоуглерода в растительности на расстоянии 5 км от предприятия было в 2,2 раза выше, чем на расстоянии 250 км [10,15].

Исследование удельной активности радиоуглерода в воздухе и растениях в северно-западном направлении от ПО «Маяк» проводили дважды – в 1965 и 1982 г

Как видно из табл. 6 в 1965 г. УАУ в указанных компонентах природной среды зависела от расстояния до предприятия. С увеличением расстояния от 3 до 17 км она снижалась в 3–4 раза. В 1982 г. показатели удельной активности углерода в воздухе и растениях выровнялись в пределах указанной территории. Можно предположить, что в условиях постоянного поступления радионуклида происходит передвижение его фронта от предприятия и включение в растения на относительно более удаленных территориях, при этом устанавливается состояние, близкое к равновесному. Видно, что загрязнение растений и воздушной среды радионуклидом в районе ПО «Маяк» в несколько (2–10) раз превышает уровень глобального фона.

Б). Водные экосистемы. Исследования, проводившиеся на водоемах в районе ПО «Маяк» и водоеме-охладителе Чернобыльской АЭС после аварии, показали, что различные виды гидробионтов накапливают этот радионуклид, как и многие другие радионуклиды, в концентрациях, на порядки величин превышающих его содержание в воде. Коэффициенты накопления зависят от вида гидробионта и варьируют на обследуемых водоемах от 500 до 20000 единиц (табл. 7).

Радиоуглерод в организме животных

Животноводческая продукция является одним из основных звеньев при поступлении ^{14}C по пищевой цепи к человеку. В организм животных радиоуглерод поступает

Таблица 6. Удельная активность углерода в воздухе и растениях на разном расстоянии от источника выброса (в числителе – средненедельные значения УАУ за июль-август месяцы; в знаменателе – минимальные и максимальные значения УАУ за этот же период при средненедельном отборе проб), Бк ^{14}C / г ^{12}C

Расстояние, км	1965 [11]		1982	
	Воздух	Растения	Воздух	Растения
3-4	1,79 0,55-2,30	1,41 0,55-2,50	1,18 0,60-2,10	1,11 0,40-2,00
6-8	0,69 0,44-1,03	0,55 0,46-0,52	1,44 0,40-2,10	1,20 0,80-1,60
10-17	0,44 0,39-0,51	0,49 0,35-0,54	1,12 0,50-2,10	1,20 0,50-2,20

в составе кормов, воды и воздуха. Первый источник имеет преимущественное значение. Поведение ^{14}C в организме животных зависит от уровня метаболизма в различных органах и формы соединений, в которых он поступает в организм. Это подтверждается следующими экспериментальными данными. У коров состояние равновесия по углероду быстрее устанавливается в органах с высоким уровнем метаболизма (печень), чем в органах с более низким уровнем обмена веществ (жировая и костная ткань) [9]. При введении радионуклида в организм овец с содовым раствором период полувыведения его из организма с молоком и калом ниже, чем при скармливании с травой, содержащей радиоуглерод. Процессы выведения радиоуглерода, поступившего в организм животных с травой, у овец в 4 раза длительнее, чем у коров.

Таблица 7. Коэффициенты накопления радиоуглерода некоторыми гидробионтами пресноводных водоемов

Водоем	Гидробионт	Коэффициент накопления
В-10	Камыш	1000
	Тростник	500
	Фитопланктон	4000
	Рыба	8000
Кожакуль	Рыба	1000
Водоем-охладитель ЧАЭС	Нитчатые водоросли	20000
	Погруженная водная растительность	9000
	Толстолобик	9000

Поступление углерода в кровь животных и время его нахождения в ней является важным показателем метаболизма животных, поскольку кровь является поставщиком кислорода и питательных веществ к клеткам и удаляет из них продукты распада. При скармливании травы, меченой радиоуглеродом, уже через 15 минут радионуклид обнаруживается в крови овец и удерживается в ней в течение 110 суток. В указанный период времени содержание радионуклида в крови животных изменялось от 0,4–0,6 до 0,03–0,01 % от введенного количества.

В молоке овец радиоуглерод обнаруживается через 3 часа после скармливания загрязненной травы в количестве 1 % от введенного количества. Молоко очищается от ^{14}C только через 25 суток после одноразового скармливания животным загрязненной радионуклидом травы. В мышцах животных радиоуглерод обнаруживается через 6 месяцев после его введения в организм.

Таким образом, при одноразовом скармливании животным травы, меченой радиоуглеродом, последний поступает в различные органы и ткани и удерживается в них до 4–6 месяцев.

На основе данных работ Н.А. Запольской и др. [9] и П.В. Житенко и др. [8] рассчитано поступление радиоуглерода с продуктами животноводства в рацион среднего человека, которое составляет (% от суммарного рациона продуктов животного происхождения):

Все молочные продукты	53
Мясо (говядина)	2
Мясо (свинина)	32
Мясо (птица)	12
Говяжий жир	1

Радиоуглерод в организме человека

Согласно данным С.Н. Демина [6], у людей, погибших от травм в городах Озерск, Касли, Кыштым, радиоуглерод был депонирован преимущественно в жировой ткани (60 % от общего количества ^{14}C во всем теле) и селезенке (25 %). Кожа, кости и красный костный мозг удерживают в себе по 4–5 % радиоуглерода, остальная его доля приходится на все остальные органы и ткани (легкие – 0,36 %, сердце – 0,3 %, печень – 1,6 %, головной мозг – 1 %, селезенка – 0,12 %, почки, гонады – 0,01–0,02 %) (рис. 2).

Распределение удельной активности углерода по органам и тканям практически одинаково и составляет для жировой и мышечной ткани, гонад и всего тела –

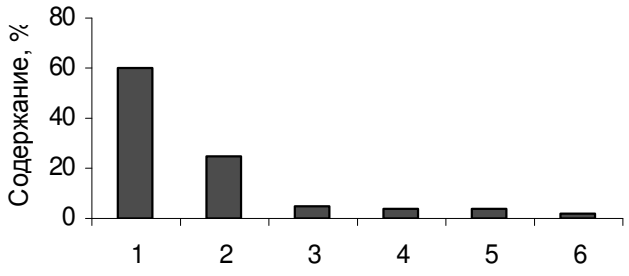

Рис. 2. Содержание радиоуглерода в органах и тканях человека (% от общего содержания в организме): 1 – жировая ткань, 2 – мышцы, 3 – кость, 4 – красный костный мозг, 5 – кожа, 6 – печень [21]

0,90 Бк/г ^{12}С. По оценке С.Н. Демина, эти показатели УАУ примерно в 4 раза превышают показатели естественного фона (0,23 Бк/г ^{12}С) и в 3 раза выше уровня техногенного фона за счет «оружейного» радиоуглерода (0,343 Бк/г ^{14}С для района г. Москвы). Вклад ПО «Маяк» в увеличение удельной активности углерода в теле человека («промышленный» радиоуглерод) оценивается автором в количестве 583 Бк/г ^{12}С.

Согласно расчетам, величины доз внутреннего облучения органов и тканей у жителей исследованных населенных пунктов, расположенных в разных секторах от предприятия, за счет углерода, выбрасываемого предприятием, составляют для жировой ткани 196 ÷ 361 мкЗв/год, а для красного костного мозга – 63 ÷116 мкЗв/год.

Поступление ^{14}С в организм жителей населенных пунктов в радиусе 15 км от предприятия составляет 245 Бк/сут. Эта величина складывается из величины поступления радиоуглерода от естественных источников (70 Бк/сут), «оружейного» радиоуглерода (25 Бк/сут) и «промышленного» радиоуглерода за счет работы предприятия (150 Бк/сут или 0,055 МБк/год). Величина поступления «промышленного» радиоуглерода в организм жителей зоны наблюдения составляет 8,7 % от предела годового поступления для населения, установленного НРБ-99.

Прогнозируя масштабы развития атомной промышленности в будущем, ученые рассчитали, что уровень концентраций радиоуглерода в жировой ткани человека к 2020 г. за счет глобальных выпадений будет соответствовать современному уровню радиоуглерода в зоне наблюдения ПО «Маяк». На основании величин ожидаемых доз облучения населения в зоне наблюдения предприятия, ^{14}С можно отнести к числу значимых радионуклидов при облучении человека, учитывая его большой период полураспада, а также тот факт, что он включается в генетические структуры половых и соматических клеток и тем самым увеличивает генетический груз для последующих поколений.

Литература

1. *Аникин А.Я., Антоненко Г.И., Кулишов Ю.В.* Массовое определение углерода-14 на низком уровне. Озерск:Экоцентр ПО «Маяк», 1997. 80 с. Радиоуглерод. Геохимия и геохронология

2. *Арсланов Х.А.* Радиоуглерод. Геохимия и геохронология. Ленинград, изд-во Ленинградского университета, 1987. 297 с.

3. *Артемова Н.Е., Бондарев А.А., Карпов В.И., Курдбмов Б.С., Романов Г.Н. и др.* Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических выбросов в приземный слой атмосферы. М.:Атомиздат, 1980. 235 с.

4. *Болин Б.* Круговорот углерода. Биосфера. Пер. с англ. Гилярова А.М., Фролова Ю.М. Изд-во «Мир». 1972. С. 91–104.

5. *Демин С.Н., Халтурин Г.В.* Уровни загрязнения углеродом-14 объектов окружающей среды в районе расположения предприятия // Бюлл. радиац. мед., 1988. № 2. С. 98–102.

6. *Демин С.Н.* Проблема углерода-14 в районе ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности, 2000. № 1. С. 81–66.

7. *Дьяконова К.В.* Почва как источник углекислоты для растений в условиях орошаемых предкавказских черноземов. М.: АН СССР, 1961. С. 119–183.

8. *Житенко П.В., Устименко Л.И.* Пособие по оценке качества продуктов животноводства. М.: Россельхозиздат, 1976. С. 208.

9. *Запольская Н.А., Павлицкая Н.Д., Федорова А.В., Шамов В.П.* Метаболизм некоторых соединений углерода-14 в организме

животных и подход к проблеме нормирования. М.: Атомиздат, 1976. С. 24.
10. *Ковалюх Н.Н., Несвитайло В.Д., Бузынный М.Г. и др*. Дендрохроноиндикация выбросов радиоуглерода сибирским химическим комбинатом г. Северска // Сб. докл. П Межд. радиоэкологической конф. «После холодной войны: разоружение, конвенция, безопасность». Красноярск, 1995. С. 156–162.
11. *Кирдин Г.С*. Исследования радиоактивного углерода, выбрасываемого во внешнюю среду предприятиями атомной промышленности. Канд. дис. М., 1970.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. М. Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификациии экспертизы. Минздрав России. 1999. 11 с.
13. Нормы радиационной безопасности НРБ-96. Госсанэпиднадзор, Москва, 1996. 125 с.
14. *Пономарева Р.П., Милакина Л.А., Савина В.И*. Закономерности поведения углерода-14 в пищевых цепях человека в условиях действия локального источника выбросов // Атомная промышленность: окружающая среда и здоровье населения / Под. ред. Л.А. Булдакова, С.Н. Демина, М., 1988. С. 240–249.
15. *Погодин П.И., Полякова Э.А., Красностанов Е.Г.* Тритий и углерод в районе расположения предприятий атомной промышленности // Проблемы охраны труда и окружающей среды. Вып. 3. М., 1986. С. 87–92.
16. Распределение естественного и искусственного углерода-14 и создаваемые им тканевые дозы: НКДАР. Distr. Restriched A/AC. 82. R.131.19 yearly. 1961. Russion.29.
17. *Рихванов Л.П.* Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 1997. 584 с.
18. *Рублевский В.П., Голенецкий С.П., Кирдин Г.С.* Радиоактивный углерод в биосфере. М.: Атомиздат, 1979. 140 с.
19. *Холина Н.Б.* Миграция в природной среде и биологическое действие ^{14}C // Итоги науки и техники. ВИНИТИ, Радиационная биология, 1983. С. 32–42.
20. *Iones S.R., Mc. Donald P*. The inventory of long lives artificial radionuclides in the Irish Sea and their radiological significance / Proc. Intern. Symp. Remediation and restoration of radioactive –contaminated sity in Europa. 1994. P. 153–206.
21. *Killough G.G., Till J.E*. Scenarios of ^{14}C releases from the world nuclear power industry from 1975 to 2020 and the estimated radiological impact // Nucl. Safety. 1979. V. 19. № 5. P. 602–617.
22. *Velure V.R., Boone F.W. and Palms I*. The environmental impact of released by a nuclear luel-reprocessing plant // Nuclear Safety. 1976. V. 17. № 5. P. 500–698.

К статье Панжина А.А., Соколовой О.В. «Деформирование породных массивов …»

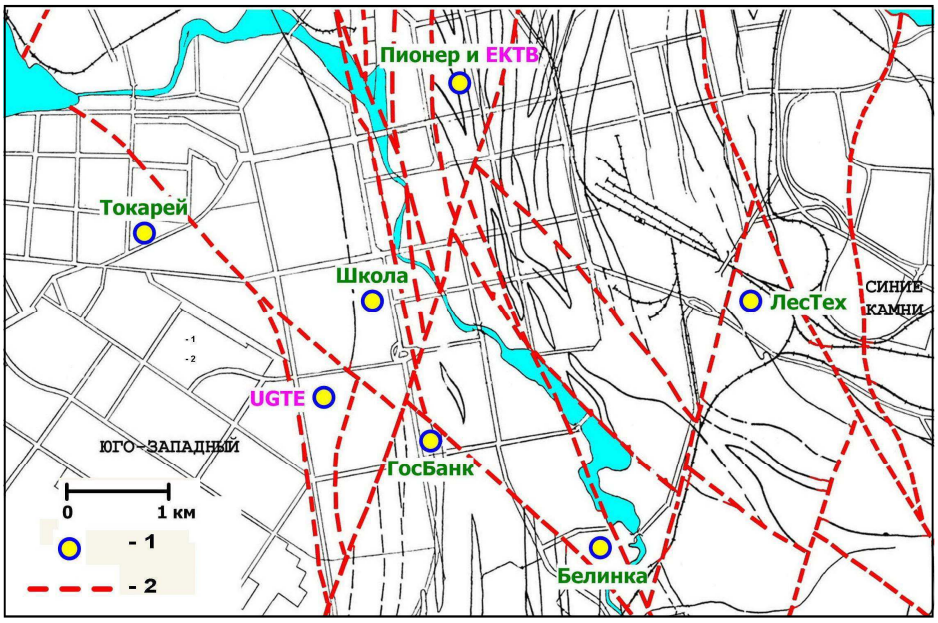

Рис. 4. Взаимное расположение станций UGTU и EKTB на тектонической карте города: 1 – оборудованные станции деформационного мониторинга; 2 – тектонические нарушения и границы структурных блоков

К статье Чеботиной М.Я., Николина О.А. и др. «Тритий в воде колодцев и скважин...»

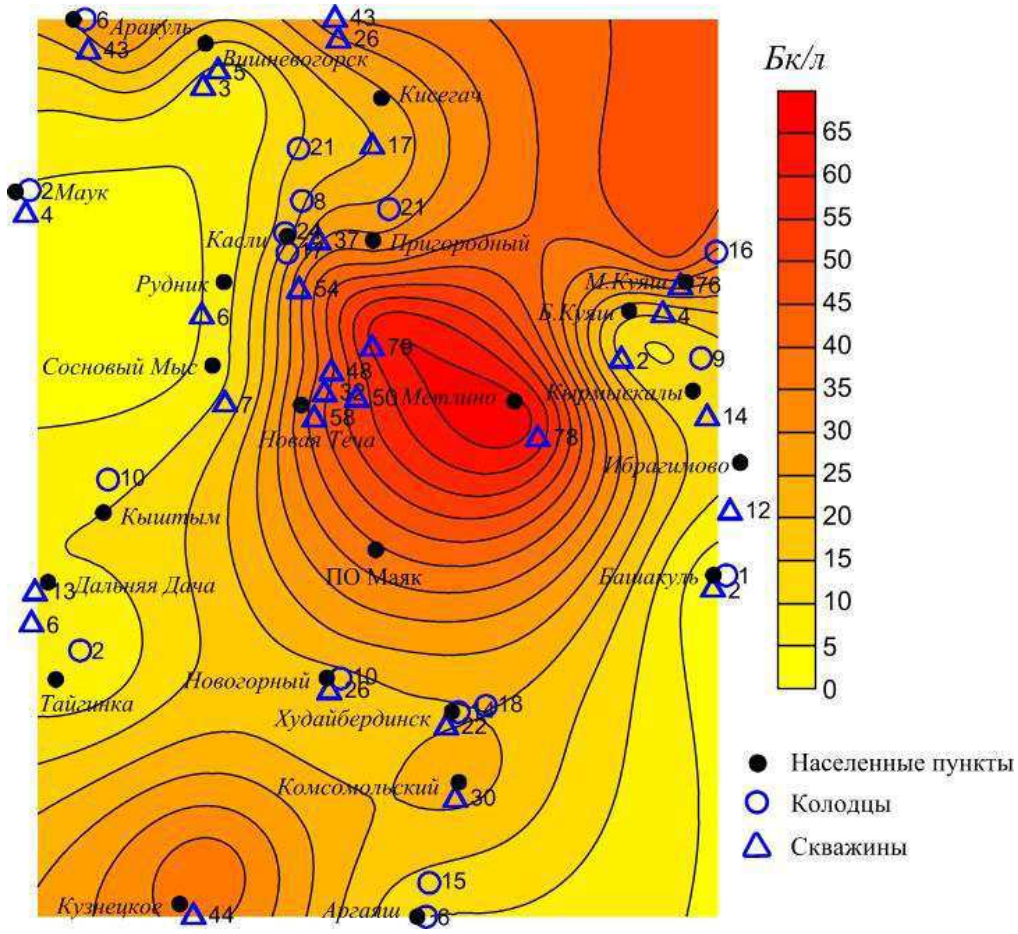

Рис. 1. Концентрации трития в воде колодцев и скважин в районе ПО «Маяк», Бк/л