

$\frac{4}{95}$

д.б.н.

АКАДЕМИЯ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ИНСТИТУТОВ ЗООЛОГИИ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БИОЛОГИИ АН КАЗССР

На правах рукописи

МАТМУРАТОВ Совет Айтмаганбетович

**ЦЕЗИЙ-137 В ЭКОСИСТЕМАХ
ВОДОЕМОВ БАЛХАШ-
АЛАКОЛЬСКОГО БАССЕЙНА**

(Радиоэкологическое исследование)
(03.00.18 — гидробиология, 03.00.01 — радиобиология)

(Диссертация написана на русском языке)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

АЛМА-АТА — 1975

Работа выполнена в лаборатории водных животных
Института зоологии АН КазССР.

Научные руководители:

кандидат биологических наук А.С.Малиновская

кандидат физико-математических наук Д.Г.Флейшман

Ведущее научно-исследовательское учреждение -

Институт экологии растений и животных Уральского
научного центра АН СССР

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук А.И.Агапова,

кандидат биологических наук Г.Г.Ким.

Защита диссертации состоится на заседании Объединенного
Ученого Совета Институтов зоологии и экспериментальной биологии
АН Казахской ССР *13 мая* 1975 года

Автореферат разослан

1975 года

Отзывы просим направлять по адресу: 480072 г.Алма-Ата,
проспект Абая, 38, Институт экспериментальной биологии
АН КазССР, Ученому секретарю Совета

Ученый секретарь Совета
доктор биологических наук
профессор

А.М.Мурзамадиев

Радиоактивные вещества, появившиеся в биосфере в результате испытаний ядерного оружия и развития атомной энергетики, как новый фактор внешней среды, ставят перед наукой задачу всестороннего изучения воздействия его на живую природу с тем, чтобы создать теоретические основы для предвидения биологических последствий использования нового вида энергии.

В связи с этим возникло и оформилось новое научное направление — радиоэкология, изучающая воздействие этого фактора на живую материю на уровне сложных природных комплексов — биогеоценозов. В силу специфических особенностей природных сред, эта наука дифференцируется на радиоэкологию наземных биоценозов и радиоэкологию гидробиоценозов (морская и пресноводная радиоэкология). Основные задачи радиоэкологии водных организмов — изучение поведения и биологического действия естественных и искусственных радионуклидов в водных биоценозах.

Широкие возможности в разработке этих проблем открыты перед радиоэкологией пресноводных организмов. Большое разнообразие континентальных водоемов позволяет полнее проследить в естественных условиях закономерности накопления радиоактивных веществ гидробионтами в зависимости от различных факторов среды.

Изучены пресноводные биоценозы в радиоэкологическом отношении еще в недостаточной степени, особенно в области накопления компонентами гидробиоценоза в природных условиях одного из наиболее опасных радионуклидов — цезия-137, присутствующего в живых организмах в заметных количествах вследствие выщелачивания его в процессе метаболизма. Исследования, проведенные в этом направлении на территории СССР в настоящее время (Флейшман и др., 1965; Флейшман, 1968; Куликов и др., 1968; Соколов и др., 1970; Соколов, 1972), в большинстве своем относятся к экосистемам слабоминерализованных озер зоны достаточного увлажнения, где существенную роль в очистке водоемов играет вынос растворенных радионуклидов с водным стоком. В безсточных водоемах аридной зоны этот фактор отсутствует и поступившие в экосистему долгоживущие радионуклиды сохраняются в ней длительное время, перераспределяясь между отдельными компонентами в процессе биотического и абиотического круговорота.

В этом отношении определенный интерес представляют ценозы наиболее крупных водоемов Балхаш-Алакольской системы, расположенных в полупустынной зоне юго-востока Казахстана и значительно различающихся по минерализации воды и ряду других экологических факторов. В 1970

году на главной артерии, питающей оз. Балхаш (р. Или), было сооружено и начало заполняться Капчагайское водохранилище, которое мы рассматриваем как полупроточный водоем, выполняющий в какой-то степени функции отстойника и аккумулятора взвешенных частиц, поступающих с водами р. Или в оз. Балхаш.

Исходя из этого, мы сочли необходимым провести комплексное радиоэкологическое исследование гидробиоценозов вышеуказанной системы, основной целью которого явилось изучение закономерностей накопления цезия-137 пресноводными гидробионтами в условиях аридной зоны.

В задачу исследований входило установление современных уровней цезия-137 и тенденций к их изменению в абиотических и биотических компонентах экосистем, выяснение роли гидрохимических параметров водоемов и экологических факторов (в частности особенностей питания) при накоплении этого радионуклида гидробионтами; изучение взаимосвязи между поведением стабильного и радиоактивного цезия и их неизотопного макроносителя калия в процессе биогенной миграции.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материал исследований представлен полевыми сборами проб воды, грунтов, растительности, планктона, бентоса и рыб в наиболее крупных водоемах юго-востока Казахстана: оз. Балхаш, Алакольской системе озер - Сасыкколь, Уялы, Алаколь и в Капчагайском водохранилище в течение 1970-1972 г.г.

Отбор проб на оз. Балхаш и Капчагайском водохранилище проводился во время выездов научно-исследовательских судов по сетке определенных станций. На озерах Алакольской системы материал собирали выборочно по нескольким станциям.

Всего было проанализировано 2066 проб, в том числе на цезий-137 - 990, на калий - 1030, на стабильный цезий - 46.

Содержание цезия-137 в гидробионтах и грунтах измеряли непосредственно в зольных остатках, полученных путем прокаливании проб в муфельной печи при температуре не выше 450°C. Пробы воды предварительно концентрировали или путем выпаривания или с помощью ионообменной смолы КУ-2 в H⁺-форме. В пробах воды с высокой минерализацией концентрирование цезия-137 проводили методом соосаждения с ферроцианидом калия (Иванова, 1967).

Содержание цезия-137 в пробах определяли на сцинтилляционном β -спектрометре. Детектором β -излучения служил кристалл NaI(Tl)

диаметром 45 мм и высотой 50 мм с колодцем, позволяющим производить определение цезия-137 в пробах зола мышечной ткани до 2 г, что приблизительно соответствует 100-200 г влажного веса. Эффективность регистрации γ -квантов цезия-137 составляла 7% при фоне 7 имп/мин, в интервале энергий 620-700 кэв.

Проверка фона установки (с помощью χ^2 -критерия) показала его высокую стабильность, что позволило оценить точность измерения активности проб по статистическим формулам, справедливым для установок с постоянным фоном (Дементьев, 1967). Оптимальное время отдельного измерения зависело от скорости счета образца и варьировало от 60 до 360 мин.

Калий определяли на пламенном фотометре ФПЛ-1 по аналитической линии 770 нм. Пробы воды фотометрировали непосредственно, ткани животных - после обработки навески зола концентрированной азотной кислотой и соответствующего разбавления дистиллированной водой. Пробы растений и грунтов переводили в раствор разложением твердых образцов смесью плавиковой и серной кислот. Приготовление стандартных растворов выполняли с учетом ориентировочного минерального состава исследуемых проб. Ошибки измерений при определении калия не превышали 5%.

Содержание стабильного цезия в пробах определяли с помощью спектрофотометра, собранного на базе спектрографа ИСП-51 с фотоэлектрической приставкой ФЭП-1 и самопишущим потенциометром ПС-1-02. Регистрация излучения проводилась с помощью фотоумножителя ФЭУ-22 путем сканирования спектра. Пламя - ацетилен - воздух. Ошибки измерений при определении цезия методом добавок в исследованных пробах не превышали 30%.

Оценку достоверности и точности полученных результатов, сравнение различных параметров и другую статистическую обработку проводили в соответствии с общими правилами биологической статистики (Плохинский, 1961; Урбах, 1964).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цезий-137 и его аналоги в озерной воде и донных отложениях

Характерной чертой оз. Балхаш и Алакольской системы озер является увеличение минерализации воды и изменение ее химического состава с запада на восток за счет протекающих здесь процессов метаморфизации (Беремжанов, 1968), что сказывается и на распределении в воде

озер щелочных элементов. Данные наших анализов показывают, что содержание калия в воде увеличивается по мере роста ее общей минерализации (табл. I), при этом отмечаются существенные расхождения в распределении калия и натрия. Относительная роль натрия в формировании солевого состава воды с увеличением ее минерализации заметно повышается, роль же калия по существу снижается, что является свидетельством более низкой миграционной способности калия по сравнению с натрием и активном участии его в обменно-адсорбционных процессах. Некоторое повышение относительного содержания калия в воде с увеличением ее минерализации в оз. Балхаш, очевидно, связано с особенностями происходящих здесь процессов метаморфизации, ведущих к обеднению воды карбонатными солями кальция и образованию известковых и доломитовых отложений.

Таблица I
Минерализация и концентрация калия и цезия в воде озер Балхаш-Алакольского бассейна (1970-1971 гг.)

Водоемы	Σ солей мг/л	К мг/л	Св мг/л	Св/К 10 ⁻⁶	К. 10 ³ Σ сол.
<u>Оз. Балхаш</u>					
I - район	950,6	10,0	0,20 ± 0,05	20,00 ± 5,00	10,5
II - район	1522,5	22,0	-	-	14,4
III - район	2691,0	52,0	-	-	19,7
IV - район	3756,0	68,0	-	-	18,1
V - район	4305,4	80,0	-	-	18,6
<u>Алакольские озера</u>					
Сасыкколь	342,7	3,5	-	-	10,2
Уялы	876,0	10,0	0,17 ± 0,04	17,00 ± 4,00	11,4
Алаколь	7660,0	25,0	0,26 ± 0,07	10,40 ± 3,00	3,3
<u>Канчагайское в-ще</u>	426,0	3,0	-	-	7,0

Содержание стабильного цезия в воде озер также тесно связано с ее минерализацией, в наиболее минерализованных водоемах (Балхаш, Уялы, Алаколь) концентрации его находятся в пределах 0,17-0,26 мг/л. В оз. Сасыкколь и в Канчагайском водохранилище цезий присутствует в более низких концентрациях, не превышающих чувствительности примененного нами спектрофотометра.

Обращает на себя внимание сравнительно высокое в озерах соотношение между цезием и калием, что, очевидно, обусловлено своеобразием формирования химического состава поверхностных вод в аридной зоне, где сильно выражены процессы испарения.

Концентрации цезия-137 в воде варьируют значительно и достигают наиболее высоких значений в оз.Балхаш - до 1,32 пкюри/л (табл.2). Уровни его здесь несколько повышаются от 1970 к 1972 г. В Алакольской системе различия между отдельными озерами в содержании радиоцезия выражены незначительно и находятся в пределах ошибок измерений. В сравнительно низких концентрациях цезий-137 присутствует в воде Капчагайского водохранилища - 0,20-0,24 пкюри/л, что, по-видимому, обусловлено непосредственным выносом растворенных радионуклидов с водным стоком. Преимущественное же накопление их происходит в бессточном оз.Балхаш.

Таблица 2

Концентрации цезия-137 в воде озер Балхаш-Алакольского бассейна

В о д о е м ы	Дата отбора	К мг/л	$C_{\text{ц}}^{137}$ пкюри/л	$C_{\text{к}}^{137}/\text{К}$ пкюри/Г К
<u>Оз. Балхаш</u>				
I - район	П - 1971	10,0	0,67±0,10	67±10
I - район	УП - 1971	10,0	1,25±0,15	125±15
I - район	У - 1972	10,0	1,32±0,17	132±17
П - район	УП - 1971	22,0	1,20±0,15	55±7
IV - район	Х - 1972	68,0	1,14±0,18	17±3
<u>Алакольские озера</u>				
Сасыкколь	VI - 1970	3,5	0,50±0,09	143±26
Уялы	VI - 1970	10,0	0,46±0,08	46±8
Алаколь	VI - 1970	25,0	0,55±0,11	22±4
<u>Капчагайское в-ще</u>				
	У - 1971	3,0	0,20±0,03	67±10
	УП - 1971	3,0	0,24±0,03	80±10
	Х - 1971	3,0	0,22±0,03	73±10

Из озерных отложений нами исследованы наиболее распространенные: серые илы, песчаные илы и мелкозернистые пески, которыми заняты основные площади профундали и литорали озер. В наиболее высоких концентрациях цезий-137 присутствует в серых илах - до 2010±296

пкюри/кг сырого веса (табл.3), менее обогащены радиоцезием песчаные илы. Концентрации его в этом виде отложений достигали измеримых зна-

Таблица 3

Концентрации, коэффициенты накопления и дискриминации цезия-137 и калия в озерных грунтах (на сырой вес)

Виды грунтов	Концентрации		Коэф. накопления		Коэф. дискриминации Д
	К г/кг	Cв ¹³⁷ пкюри/кг	К	Cв ¹³⁷	
<u>Оз. Балхаш</u>					
I - район 1972.У					
Песчаный ил	2,85	1460 ± 190	285	1110 ± 235	4,1
Серый ил	3,43	2010 ± 296	343	1520 ± 338	4,4
II- район 1971.УП					
Песок мелкий	2,47	-x)	112	-	-
Песчаный ил	3,20	965 ± 140	145	805 ± 178	5,5
Серый ил	3,58	1250 ± 158	168	1040 ± 218	6,3
IU - район 1972.Х					
Серый ил	3,75	1080 ± 180	55	950 ± 224	16,5
<u>Оз. Сасыкколь 1970.У1</u>					
Песок мелкий	2,70	-	770	-	-
Песчаный ил	2,94	830 ± 135	810	1660 ± 405	2,0
Серый ил	3,36	1135 ± 171	960	2270 ± 535	2,4
<u>Оз. Уялы 1970.У1</u>					
Песчаный ил	2,88	-	288	-	-
Серый ил	3,14	800 ± 112	314	1740 ± 388	5,5
<u>Оз. Алаколь 1970.У1</u>					
Песок мелкий	2,76	-	110	-	-
Песчаный ил	3,02	-	121	-	-
Серый ил	3,89	805 ± 94	155	1460 ± 305	9,4
<u>Капчагайское в-ще 1971.УП</u>					
Песчаный ил	2,91	-	970	-	-
Серый ил	3,22	579 ± 87	1070	2420 ± 620	2,3

x) - Концентрации не превышают пороговой чувствительности спектрометра.

чений лишь в Западном Балхаше и оз.Сасыкколь. Уровни активности цезия-137 в песчаных грунтах, как правило, не превышали пороговой

чувствительности спектрометра.

В целях сравнения наряду с абсолютными концентрациями нами использовались также относительные концентрационные параметры такие, как коэффициент накопления (КН), представляющий собой отношение концентраций элемента в исследуемом объекте к его концентрации в воде, и коэффициент дискриминации (Д), показывающий как изменяется соотношение радионуклид/макроноситель в объекте по сравнению с водной средой. Определялся коэффициент дискриминации цезий-137/калий по формулам:

$$D = \frac{(Cs^{137}/K) \text{ объект}}{(Cs^{137}/K) \text{ вода}} \quad \text{или} \quad D = \frac{КН_{Cs^{137}}}{КН_K}$$

В озерных грунтах коэффициенты накопления радиоцезия достигают высоких значений - до 2420 ± 620 пикри/кг, из чего можно заключить, что в исследуемых водоемах происходит интенсивное удаление радиоцезия из воды в донные отложения за счет сорбционных процессов. В этом отношении особенно значительна роль серых илов - доминирующего биотопы в озерах, для которого характерны наиболее высокие коэффициенты накопления радиоцезия.

По содержанию калия грунты образуют тот же ряд, что и по цезию-137: серый ил > песчаный ил > песок. В то же время у всех исследованных грунтов $D > 1$, то есть в накоплении озерными отложениями цезия и калия заметно проявляется химическая индивидуальность этих элементов. Для цезия отмечается более высокая склонность к взаимодействию с веществом в твердой фазе нежели для калия. Различие концентраций калия в воде озер сравнительно слабо влияет на поступление радиоцезия в озерные отложения. Более важным фактором, определяющим поведение этих элементов, очевидно, являются состав и свойства грунтов.

Содержание стабильного цезия в иловых отложениях приблизительно одинаково по всей водоемам и находится в пределах $1,05 \pm 0,13 - 1,25 \pm 0,16$ мг сг/кг грунта. Учитывая то, что найденные концентрации цезия в донных отложениях того же порядка, что и в наземных почвах (5-10 мг сг/кг почвы) (Виноградов, 1957), можно полагать, что в процессах миграции микроколичеств цезия, а следовательно и цезия-137 в донные отложения существенную роль играет специфическое необменное закрепление ионов в минеральной части осадков подобно тому, как это имеет

место в почвах (Тиглянова, 1963; Тимофеев-Ресовский и др., 1966).

Цезий-137 в гидрофитах и беспозвоночных организмах

В исследуемых водоемах наряду с процессами миграции и перераспределения цезия-137 по абиотическим компонентам происходит и биогенная миграция этого радионуклида. Присутствие его обнаруживается почти во всех доминирующих видах водных растений и беспозвоночных организмов (табл.4).

Уровни цезия-137 в гидрофитах и беспозвоночных организмах варьируют значительно и достигают наиболее высоких значений в Западном Балхаше и оз.Сасыкколь. Найденные максимальные концентрации радиоцезия составляли: для водорослей - 172 ± 16 ; макрофитов - 120 ± 11 ; зообентоса - 128 ± 11 ; зоопланктона - 57 ± 8 пикюри/кг сырого веса.

Гидробионты, обитающие в водоемах повышенной минерализации (оз. Алаколь, Восточный Балхаш) имеют уровни цезия-137, как правило, не превышающие пороговой чувствительности спектрометра и достигают измеримых значений лишь у некоторых видов.

В пределах одного водоема гидрофиты содержат радиоцезия примерно столько же, что и организмы зообентоса. Более низкие уровни наблюдаются у зоопланктонных организмов, что свидетельствует о слабой аккумуляции радиоцезия этими видами водных беспозвоночных.

Среди гидрофитов наиболее высокими коэффициентами накопления характеризуются харовые водоросли, другие виды водных растений накапливают радиоцезий в меньшей степени, причем полученные данные не позволяют выявить заметных различий в накоплении цезия-137 растениями из различных систематических и экологических групп.

У бентосных беспозвоночных высокие коэффициенты накопления радиоцезия отмечаются для придонных организмов - мизид *Paramevis (M.) intermedia*, моллюсков *Monodasna colorata* и *Lymnaea stagnalis*. Более низкие коэффициенты накопления радиоцезия характерны для обитателей толщи грунта - личинок хирономид *Chironomus* sp.

Содержание калия у исследованных групп гидробионтов варьирует в следующих пределах: для водорослей - 1,0-2,96; макрофитов - 1,16-2,65; зообентоса - 0,83-1,46; зоопланктона - 0,47-0,90 г/кг сырого веса.

В приведенном материале довольно четко прослеживается взаимосвязь между накоплением гидробионтами цезия-137 и калия. Так сравни-

Таблица 4

Концентрации, коэффициенты накопления и дискриминации цезия-137 и калия в гидрофитах и беспозвоночных организмах в 1970-1972 гг (на сухой вес)

В и д ы	Концентрации		Коэф. накопления		Д
	К г/кг	Cs ¹³⁷ пкюри/кг	К	Cs ¹³⁷	
I	2	3	4	5	6

Оз. Балхаш

I - район

<i>Diaphanosoma brachyurum</i> , <i>Daphnia balchaschensis</i>	0,72	57 ± 8	72	46 ± 9	0,63
<i>Chara</i> sp.	2,96	172 ± 16	296	130 ± 21	0,44
<i>Potamogeton lucens</i>	2,31	103 ± 10	231	78 ± 13	0,34
<i>Phragmites communis</i>	1,31	120 ± 11	131	91 ± 14	0,70
<i>Anodonta cellensis</i>	0,85	50 ± 8	85	40 ± 8	0,47
<i>Lymnaea stagnalis</i>	0,98	118 ± 11	98	95 ± 15	0,96
<i>Monodacna colorata</i>	0,91	108 ± 10	91	86 ± 13	0,95
<i>Paramysis</i> (M) <i>intermedia</i>	1,13	128 ± 11	113	102 ± 15	0,90
<i>Chironomus</i> sp. (larvae)	1,22	67 ± 9	122	53 ± 9	0,44

II - район

<i>Mesocyclops oithonoides</i> , <i>Arctodiaptomus salinus</i>	0,90	34 ± 8	41	28 ± 7	0,68
<i>Mougeotia</i> sp., <i>Cladophora</i> <i>fracta</i>	1,82	62 ± 9	83	52 ± 10	0,63
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	1,98	59 ± 6	90	49 ± 8	0,55
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1,24	76 ± 9	56	63 ± 12	1,12
<i>Monodacna colorata</i>	1,10	69 ± 8	50	58 ± 10	1,16
<i>Paramysis</i> (M) <i>intermedia</i>	1,28	85 ± 10	58	71 ± 12	1,20
<i>Chironomus</i> sp. (larvae)	1,46	54 ± 7	66	45 ± 8	0,67

IV - район

<i>Arctodiaptomus salinus</i>	0,81	- x)	12	-	-
-------------------------------	------	------	----	---	---

Оз. Сасыкколь

<i>Cyclops</i> sp., <i>Diatomus</i> sp.	0,60	45 ± 8	172	90 ± 23	0,52
<i>Chara</i> sp.	1,94	95 ± 9	555	190 ± 39	0,34
<i>Nuphar luteum</i>	1,79	74 ± 8	510	148 ± 31	0,29
<i>Scirpus lacustris</i>	1,62	52 ± 7	463	104 ± 23	0,22
<i>Lymnaea stagnalis</i>	0,83	87 ± 10	238	174 ± 37	0,73

I	2	3	4	5	6
<i>Chironomus</i> sp. (imago)	1,24	38 ± 6	354	76 ± 18	0,22
<u>Оз. Уялы</u>					
<i>Mesocyclops</i> sp., <i>Keratella cochlearis</i>	0,78	23 ± 5	78	50 ± 14	0,64
<i>Spirogyra</i> sp.	1,82	54 ± 6	182	117 ± 21	0,64
<i>Nuphar luteum</i>	2,65	51 ± 7	265	111 ± 25	0,41
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1,16	46 ± 6	116	100 ± 22	0,86
<u>Оз. Аляколь</u>					
<i>Arctodiaptomus salinus</i> , <i>Cyclops</i> sp.	0,77	-	31	-	-
<i>Gladophora fracta</i>	2,29	33 ± 7	92	60 ± 18	0,65
<i>Chara</i> sp.	2,86	44 ± 9	114	80 ± 23	0,68
<i>Potamogeton lucens</i>	1,92	-	77	-	-
<i>Polygonum amphibium</i>	2,33	-	93	-	-
<i>Chironomus</i> sp. (larvae)	1,36	-	55	-	-
<u>Кепчаргайское в-ще</u>					
<i>Daphnia longispina</i> , <i>Mesocyclops crassus</i>	0,58	25 ± 6	193	104 ± 28	0,54
<i>Gladophora</i> sp.	1,00	35 ± 5	334	146 ± 28	0,44
<i>Paramysis (M) intermedia</i>	1,20	44 ± 7	400	183 ± 37	0,46
<i>Chironomus</i> sp. (imago)	1,18	-	394	-	-

x) - Концентрации цезия-137 в пробах не превышают пороговой чувствительности спектрометра

тельно слабое накопление радиоцезия в зоопланктоне озер можно объяснить невысоким содержанием в этих организмах калия. Можно также видеть, что коэффициенты накопления радиоцезия, как и калия, у одних и тех же видов существенно снижаются с увеличением содержания калия в озерной воде.

Сравнительное исследование соотношений, в которых цезий-137 и калий накапливаются в организмах, показывает, что коэффициенты дискриминации цезий-137/калий у большинства видов не достигают единицы и лишь в отдельных случаях несколько превышают это значение, то есть отношение цезий-137/калий в гидрофитах и беспозвоночных организмах по существу всегда ниже чем в озерной воде. В целом коэффициенты дискриминации цезий-137/калий у исследованных групп гидробионтов на-

ходились в следующих пределах: для водорослей - 0,34-0,65; макрофитов - 0,22-1,12; зообентоса - 0,22-1,20; зоопланктона - 0,52-0,64. Более широкий разброс значений D у макрофитов и донных беспозвоночных, по-видимому, есть следствие не только их физиологических особенностей, но и непосредственной связи с донным субстратом, где наблюдаются значительные проявления химической индивидуальности цезия и калия. Вариация соотношений концентраций и прочности фиксации этих элементов в различных по составу осадках, очевидно, сказывается и на величине соотношения, в котором калий и цезий-137 поступают в донные организмы.

Учитывая невысокую биомассу беспозвоночных в озерах (максимальная биомасса зоопланктона не превышает $2,7 \text{ г/м}^3$, зообентоса - 9 г/м^2) и сравнительно слабое накопление ими радиоцезия (KH не превышает 200), можно полагать, что в популяциях беспозвоночных содержится незначительная часть радиоцезия, поступившего в исследуемые водоемы.

Цезий-137 в икhtiоценозе

При исследовании рыб мы, как правило, анализировали мышечные ткани. В отдельных случаях проводилось изучение особенностей распределения цезия-137 по различным органам и тканям. У всех исследованных видов прослеживается одинаковая закономерность: наибольший уровень цезия-137 характерен для мышечной ткани, минимальный - для костной, активность которой, как правило, не превышала пороговой чувствительности спектрометра. При этом наблюдается следующая последовательность распределения цезия-137 по органам и тканям: мышцы > сердце > печень > почки > гонады > жабры > костная ткань.

Уровни цезия-137 в мышечной ткани рыб отличаются большим разнообразием. Наиболее высокие концентрации его - до 507 пкюри/кг сырого веса обнаружены нами у рыб, обитающих в оз. Сасыкколь и в I - районе оз. Балкаш, наиболее низкие - у рыб из высокоминерализованного оз. Алаколь - до 58 пкюри/кг сырого веса. Уровни цезия-137 в рыбах несколько повышаются от 1970 к 1972 г. (табл. 5).

В целом уровни радиоцезия в рыбах из исследованных нами водоемов несколько выше уровней, характерных для морских рыб (Патин, Петров, 1973) и в среднем на порядок ниже таковых рыб из слабоминерализованных озер (Солис и др., 1970).

Наблюдаемые различия в накоплении цезия-137 рыбами из разных

Таблица 5

Уровни содержания цезия-137 в млечной сыви промышленной риб водоемов Балхн-Алякольского бассейна (период сырого веса)

Виды	Год отлова	Балхн (районы)		[у	Саянская	Уаы	Аляколь	Качества-СКОБ В-Ще
		I	II					
Сазан	1970	116 ± 8	81 ± 5	32 ± 3	241 ± 36	45 ± 4	26 ± 13	-
Сазан	1971	97 ± 65	74 ± 6	-	-	-	-	129 ± 20
Сазан	1972	167 ± 9	-	44 ± 7	-	-	-	-
Лец	1970	161 ± 8	111 ± 6	-	-	-	-	-
Лец	1971	117 ± 57	65 ± 5	-	-	-	-	115 ± 18
Лец	1972	154 ± 9	-	-	-	-	-	-
Маринка	1970	48 ± 5	57 ± 6	-	102 ± 8	-	-	-
Маринка	1971	98 ± 71	-	-	-	-	-	71 ± 9
Маринка	1972	-	-	20 ± 8	-	-	-	-
Жерех	1970	190 ± 11	-	-	-	-	-	-
Жерех	1971	194 ± 64	-	-	-	-	-	148 ± 10
Жерех	1972	286 ± 14	-	-	-	-	-	-
Окунь	1970	330 ± 16	182 ± 9	50 ± 4	488 ± 11	122 ± 43	47 ± 16	-
Окунь	1971	239 ± 100	282 ± 13	-	-	-	-	178 ± 28
Окунь	1972	-	-	72 ± 5	-	-	-	-
Судак	1970	342 ± 17	202 ± 10	-	-	-	-	-
Судак	1971	262 ± 94	302 ± 15	-	-	-	-	201 ± 50
Судак	1972	482 ± 24	-	94 ± 9	-	-	-	-

x) - Приведены стандартные отклонения

водоемов определенным образом связаны с изменениями концентрации калия в озерной воде. Статистическая обработка результатов исследований для таких распространенных в озерах видов как сазан и окунь, показала наличие достоверной корреляции между величинами коэффициентов накопления калия и цезия-137 и содержанием калия в озерной воде.

Представляется она следующими уравнениями регрессии:

$$\text{для окуня} \quad \lg \text{КН}_{\text{К}} = 3,37 - 0,96 \cdot \lg [\text{К}]_{\text{в воде}}$$

$$\lg \text{КН}_{\text{Св-137}} = 3,31 - 0,84 \cdot \lg [\text{К}]_{\text{в воде}}$$

$$\text{для сазана} \quad \lg \text{КН}_{\text{К}} = 3,37 - 0,94 \cdot \lg [\text{К}]_{\text{в воде}}$$

$$\lg \text{КН}_{\text{Св-137}} = 3,06 - 0,89 \cdot \lg [\text{К}]_{\text{в воде}}$$

Значения коэффициентов корреляции составляли соответственно: для окуня (-0,99) и (-0,95), для сазана (-0,98) и (-0,95).

Таким образом, зависимость коэффициентов накопления цезия-137 от концентрации калия в воде, выявленная ранее для рыб из слабоминерализованных озер (до 5 мг калия на литр) (Preston et al., 1967), достаточно четко прослеживается и в исследованных нами более минерализованных озерах с концентрациями калия в воде от 3 мг/л до 80 мг/л.

Полученные зависимости, очевидно, являются непосредственным следствием взаимосвязанного поступления этих элементов в организмы рыб, при этом цезий, по-видимому, поступает как спутник калия и не играет самостоятельной роли в метаболизме рыб.

Концентрации радиоцезия в мышечной ткани рыб, обитающих в одном водоеме, значительно варьирует, особенно у видов с неоднотипным питанием. В таблице 6 приведены значения средних коэффициентов накопления радиоцезия для различных видов рыб по всем исследованным водоемам. Во всех случаях коэффициенты накопления радиоцезия у хищников существенно превышают таковые мирных видов. Последние в большинстве своем являются бентофагами и питаются в водоемах довольно разнообразной пищей. Это, по-видимому, и приводит к значительным вариациям у них коэффициентов накопления радиоцезия.

В оценке путей поступления радиоцезия в организм рыб определенный интерес представляют те изменения в пищевых взаимоотношениях рыб, которые наметились в исследуемых водоемах в связи с акклиматизацией ряда кормовых беспозвоночных. Так, если жерех обычно переходит на хищное питание с раннего возраста, то в оз. Балхаш в его питании до 5-6-летнего возраста доминируют акклиматизированные здесь мидии (Ворообьева, 1973). Можно видеть, что и коэффициенты накопления

Таблица 6

Коэффициенты накопления цезия-137 в мышечной ткани рыб
за 1970-1972 гг.

В и д ы	Балхаш (районы)				Саянское	Уяны	Алаколь	Качагтай-ское	В-Ще
	I	II	IV						
<u>Мирные рыбы</u>									
Сазан	106 ± 44 x)	62 ± 9	39 ± 9	481 ± III	98 ± 19	47 ± 23	564 ± 70		
Дец	121 ± 34	54 ± 8	-	-	-	-	510 ± 79		
Плотва	78 ± 3	-	-	-	-	-	527 ± 81		
Карп	-	-	-	-	-	-	535 ± 50		
Серебряный карась	-	-	-	-	-	-	478 ± 77		
Востробрюшка	-	-	-	-	-	-	590 ± 95		
Щип	-	-	-	-	-	-	565 ± 87		
Белый амур	-	-	-	-	-	-	388 ± 59		
Марианка	95 ± 18	48 ± 8	18 ± 5	204 ± 40	-	-	320 ± 50		
<u>Ущипные рыбы</u>									
Херек	197 ± 20	-	-	-	-	-	673 ± 39		
Окунь	276 ± 41	235 ± 46	63 ± 11	976 ± 23	264 ± 93	85 ± 28	795 ± 132		
Судак	317 ± 64	251 ± 33	83 ± 15	-	-	-	884 ± 216		
Сом	270 ± 35	-	-	-	-	-	-		

x) - Приведены стандартные отклонения.

радиоцезия у жерева здесь существенно ниже чем у хищных рыб. Аналогичная ситуация наблюдается и у маринки. Коэффициенты накопления радиоцезия у этого вида в большинстве водоемов существенно ниже, чем у других бентосоядных рыб. Исключение составляет маринка из Западного Балхаша, у которой коэффициенты накопления радиоцезия близки к таковым для других рыб-бентофагов. Данные по питанию показывают, что если в других водоемах этот вид питается исключительно водной растительностью и детритом, то в Западном Балхаше маринка так же, как и сазан питается в основном акклиматизированной здесь монодакной, то есть можно сказать, что с переходом на животный корм в ней повышаются концентрации радиоцезия.

Довольно четко в исследуемых водоемах прослеживаются возрастные различия в накоплении цезия-137 рыбами. Как правило, наблюдается увеличение содержания цезия-137 в рыбах с возрастом (табл.7), что отмечено и в работах Д.Г.Флейшмана (1971) и А.А.Солос (1972). Подобные возрастные различия в накоплении цезия-137 рыбами, указанные авторы объясняют увеличением периода полувыведения цезия-137 из организма рыб с возрастом и сменой типа питания. Хорошим примером, иллюстрирующим влияние смены типа питания на накопление цезия-137 рыбами в исследуемых водоемах, может служить окунь, младшие возрастные группы которого питаются зоопланктоном и бентоосом и характеризуются довольно низкими коэффициентами накопления по сравнению с рыбами старших возрастов, перешедших на рыбный рацион.

Некоторое представление об особенностях накопления цезия-137 по сравнению с накоплением калия пресноводными рыбами дают данные табл.8, в которой приведены коэффициенты дискриминации D , полученные для исследованных видов рыб. Для сравнения в табл.9 значения коэффициентов дискриминации D у рыб с различным типом питания сопоставлены с таковыми зоопланктона, зообентоса и водной растительности. Здесь же приведены коэффициенты D для отдельных групп гидробионтов из озер северо-запада СССР (Солос, 1972).

Как видно, коэффициенты дискриминации у мирных рыб, как и у беспозвоночных животных, в большинстве случаев не превышают единицы, в то время как у ихтиофагов они в два-три раза выше, то есть для двух трофических уровней ихтиоценоза - мирные рыбы - рыбы-ихтиофаги достаточно четко проявляется "эффект трофических уровней".

Величины D у рыб одного вида из разных озер близки друг к другу и в широком диапазоне изменения минерализации воды (342,7-7660 мг/л)

Таблица 7

Коэффициенты накопления цезия-137 в мышечной
ткани рыб различных возрастных групп

В и д ы	Возраст (годы)				
	1-2	2-3	4-5	6-7	8-10
<u>Балхаш</u>					
I - район 1971.П					
Сазан	-	49 ± 9	72 ± 13	-	128 ± 22
Лещ	-	75 ± 14	-	145 ± 24	-
Окунь	-	233 ± 38	-	314 ± 49	-
Судак	-	246 ± 38	266 ± 42	398 ± 62	-
<u>Сасыкколь 1970.У1</u>					
Сазан	-	366 ± 77	490 ± 103	-	588 ± 124
Окунь	-	-	960 ± 202	992 ± 203	-
<u>Уялы 1970.У1</u>					
Окунь	-	-	198 ± 39	-	330 ± 62
<u>Алакколь 1970.У1</u>					
Сазан	25 ± 5	-	46 ± 11	-	71 ± 16
Окунь	65 ± 14	-	105 ± 23	-	-
<u>Капчагайское в-це 1971.УП</u>					
Сазан	-	490 ± 70	525 ± 74	-	675 ± 95
Лещ	-	450 ± 66	490 ± 70	-	-
Окунь	-	612 ± 81	740 ± 98	-	890 ± 118
Судак	640 ± 87	-	820 ± 109	1210 ± 161	-

не зависят от концентрации калия в воде и других гидрохимических параметров. Непосредственным выражением этого следует считать и то, что найденные нами значения D для отдельных экологических групп близки к таковым гидробионтов из слабоминерализованных озер зоны достаточного увлажнения. Полученные результаты, очевидно, указывают на возможность использования коэффициента D в качестве характеристики накопления радиоцезия гидробионтами, позволяющей обобщать данные из разных озер.

Наблюдаемые различия в величине D у гидробионтов непосредственно связаны с их экологическими особенностями. Представители бен-

Таблица 8

Коэффициент дискриминации цезий-137/рублей в месячной грани рыбы

Виды	Балхан (районы)				Саянскость	Удмы	Качагай-ское В-де	Альголь	Для всех водоемов
	I	II	IV						
<u>Мирные рыбы</u>									
Сазан	0,45±0,15 ^{x)}	0,47	0,76	0,63±0,13	0,43	0,46±0,21	0,70±0,16	0,55±0,17	
Лещ	0,52±0,13	0,47	-	-	-	-	0,60±0,21	0,55±0,13	
Плотва	0,33±0,05	-	-	-	-	-	0,60	0,42±0,15	
Карп	-	-	-	-	-	-	0,54±0,11	0,54±0,11	
Серебряный карась	-	-	-	-	-	-	0,71	0,71	
Востробрюшка	-	-	-	-	-	-	0,60	0,60	
Шип	-	-	-	-	-	-	0,63	0,63	
Белый амур	-	-	-	-	-	-	0,48	0,48	
Мариinka	0,36±0,07	0,36	0,35	0,29	-	-	0,39±0,05	0,36±0,05	
<u>Ущипные рыбы</u>									
Херек	0,79±0,05	-	-	-	-	-	0,85±0,04	0,81±0,05	
Окунь	1,20±0,22	1,73	1,41	1,36±0,18	1,10±0,29	0,89±0,22	0,89±0,17	1,13±0,32	
Сулак	1,31±0,25	1,71	2,12	-	-	-	0,96±0,19	1,27±0,41	
Сом	1,04	-	-	-	-	-	-	1,04	

x) Приведены стандартные отклонения

Таблица 9

Коэффициенты дискриминации цезий-137/калий
в пресноводных гидробионтах

Гидробионты	Коэффициент дискриминации Д	
	Водоёмы Юго-Восточного Казахстана (наши данные) [К] _В = 3-80 мг/л	Водоёмы северо-запада СССР (Солос, 1972) [К] _П = 0,27-4,3 мг/л
Водоросли	0,44-0,65	-
Макрофиты	0,22-0,90	0,35-0,65
Зоопланктон	0,52-0,68	0,35-0,50
Зообентос	0,22-1,20	0,17-0,75
Рыбы		
Планктофаги	0,71 (1)	0,30-0,40 (2)
Бентофаги	0,25-0,80 (8)	0,30-1,20 (5)
Ихтиофаги	0,70-2,12 (4)	1,00-5,00 (5)

Примечание: В скобках указано число исследованных видов.

тосной пищевой цепочки характеризуется более широким разбросом значений Д нежели планктонные организмы. Причина этого, по-видимому, заключена в связи бентосных организмов с донным субстратом, где наблюдаются значительные проявления химической индивидуальности цезия и калия.

Особенности накопления рыбами и другими гидробионтами стабильного цезия

Для более полного анализа полученных результатов по цезию-137 измерено содержание стабильного цезия в мышечной ткани сазана и окуни и в некоторых гидробионтах и беспозвоночных организмах. Результаты измерений по этому элементу сведены в таблице 10 и сопоставлены с таковыми по цезию-137. Здесь же приведены данные по воде и грунтам.

Как видно из таблицы, различные виды гидробионтов заметно отличаются друг от друга по способности накапливать цезий. При этом у всех исследованных объектов наблюдаются различия между коэффициентами накопления стабильного и радиоактивного цезия. Наиболее сильно эти различия во всех трех водоемах выражены для илов, у которых величина отношения K_{Cs-137}/K_{Cs} составляет 0,2-0,3 и удельная ак-

Таблица 10

Содержание стабильного цезия в гидробионтах водоемов
Балхаш-Алакольского бассейна (на сухой вес)

Объект	Св мкг/кг	Кoeff. накопления		КН _{Св} ¹³⁷	Св ¹³⁷
		Св	Св ¹³⁷	КН _{Св}	Св пКЮРИ мкг
<u>Балхаш. 1971. VII</u>					
Вода	0,20±0,05	-	-	-	6,00
Серый ил	1135±150	5650±1598	1040±218	0,18	1,10
Зеленые водоросли	8,2±1,6	41±13	52±10	0,84	7,56
Рдест	25,0±4,4	125±38	49±8	0,39	2,36
Зоопланктон	6,2±1,0	31±9	28±7	0,91	5,48
Монодаина	21,0±3,8	105±33	58±10	0,55	3,28
Мизиды	33,6±5,5	168±50	71±12	0,42	2,53
Сазан	23,8±4,8	119±36	62±9	0,52	3,11
<u>Уялы. 1970. VI</u>					
Вода	0,17±0,04	-	-	-	2,70
Серый ил	1050±130	6180±1669	1740±388	0,28	0,76
Кубышка	28,2±5,2	166±50	111±50	0,67	1,81
Сазан	30,3±5,6	178±54	98±19	0,55	1,12
Окунь	45,5±7,5	267±78	198±39	0,74	2,00
<u>Алаколь. 1970. VI</u>					
Вода	0,26±0,07	-	-	-	2,12
Серый ил	1230±180	4730±1443	1460±305	0,31	0,65
Харовые водоросли	28,1±5,0	108±35	80±23	0,74	1,56
Зоопланктон	9,1±1,5	35±11	-	-	-
Сазан	20,6±3,4	79±25	46±11	0,58	1,21
Окунь	62,0±10,7	161±51	105±23	0,65	0,94

тивность цезия (Cs^{137}/Cs) в 3-5 раз ниже чем в озерной воде. Все исследованные гидробионты по величине удельной активности цезия занимают промежуточное положение между озерной водой и донными отложениями. Наиболее близки к озерной воде водоросли и зоопланктон, тогда как у гидробионтов в той или иной степени связанных с грунтами

значения удельной активности цезия заметно ниже, чем в воде.

Эти результаты указывают на отсутствие изотопного равновесия (по цезию) в исследованных экосистемах. Выявленные различия в коэффициентах накопления стабильного и радиоактивного цезия обусловлены, очевидно, не особенностями физико-химического состояния изотопов цезия, а неравенством изотопного состава цезия в воде и озерных отложениях.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования изотопных отношений для анализа путей миграции цезия-137 в водных экосистемах. Для проведения детальных исследований в этом направлении необходимо в дальнейшем использовать более совершенные методики по измерению стабильного цезия.

В В О Д Ы

1. Гидрологические и гидрохимические особенности исследуемых водоемов обусловили своеобразное распределение в озерной воде калия, цезия-137 и стабильного цезия. Концентрации калия в воде увеличиваются по мере роста общей минерализации: в оз.Балхаш от 10 мг/л до 80 мг/л; в Алакольских озерах от 3,5 мг/л до 25 мг/л. Стабильный цезий в наиболее высоких концентрациях содержится в высокоминерализованном оз.Алеколь - до 0,26 мкг/л.

2. Концентрации цезия-137 в воде озер варьируют значительно и достигают наиболее высоких значений в оз.Балхаш - до 1,32 пикюри/л. Уровни его здесь несколько повышаются от 1970 к 1972 г. В воде Капчагайского водохранилища цезий-137 присутствует в сравнительно низких концентрациях (0,20-0,24 пикюри/л). Это обусловлено, по-видимому, выносом растворенных радионуклидов с водным стоком. Преимущественное же накопление их происходит в бессточном оз.Балхаш.

3. На миграцию цезия-137 в исследуемых водоемах заметное влияние оказывают сорбционные процессы, способствующие захоронению этого радионуклида в донных отложениях и снижению времени жизни его в озерной воде. Наиболее высокими коэффициентами накопления радиоцезия характеризуются доминирующие в озерах серые илы - до 2420.

4. В водных организмах цезий-137 присутствует в концентрациях, не превышающих нескольких сотен пикюри/кг сухой ткани. Величины коэффициентов накопления радиоцезия у гидробионтов заметно варьируют и достигают следующих максимальных значений: для зоопланктона - 104; макрофитов - 148; водоемтоса - 183; водорослей - 190; мирных рыб - 675; хищных рыб - 1210.

5. Накопление цезия-137 гидробионтами во многом определяется особенностями накопления его неизотопного носителя калия. С увеличением концентрации калия в озерной воде коэффициенты накопления калия и цезия-137 у гидробионтов снижаются. Для рыб эта зависимость близка к обратно-пропорциональной.

6. Значения коэффициентов дискриминации цезий-137/калий для исследованных экологических групп гидробионтов варьируют в следующих пределах: зоопланктон - 0,52-0,68; водоросли - 0,44-0,65; макрофиты - 0,22-0,90; зообентос - 0,22-1,20; мирные рыбы - 0,25-0,80; хищные рыбы - 0,70-2,12. В широком диапазоне минерализации воды (342,7-7660 мг/л) они не зависят от концентрации калия в воде и других гидрохимических параметров.

7. В условиях значительной минерализации подтвержден "эффект трофических уровней" в ихтиоценозах, заключающийся в том, что рыбы-ихтиофаги характеризуются более высокими коэффициентами дискриминации по сравнению с рыбами, питающимися бентосом и планктоном. Существование этого эффекта свидетельствует о поступлении радиоцезия в организм рыб с пищей. Влияние типа питания сказывается не только на величине, но и на вариабельности значений коэффициента дискриминации. Гидробионты, входящие в бентосную пищевую цепь, характеризуются более широким разбросом значений D , нежели планктонные организмы.

8. В исследованных нами озерных экосистемах еще не достигнуто состояние изотопного равновесия между стабильным и радиоактивным цезием. Наблюдаемые различия в величине коэффициентов накопления этих изотопов наиболее сильно выражены в озерных осадках и организмах, связанных с бентосной пищевой цепочкой.

9. Проведенные исследования создают предпосылки для прогнозирования радиозэкологической обстановки в исследуемых водоемах и открывают новые возможности для более глубокого познания процессов, протекающих в водных экосистемах.

Список работ по диссертации.

1. К вопросу накопления стронция-90 и цезия-137 некоторыми видами рыб в пресноводных водоемах. В сб. "Радиозэкология водных организмов", Рига, 1973 (Совместно с Б.И. Брагиним).

2. Накопление цезия-137 пресноводными рыбами в водоемах повышенной минерализации. В сб. "Экология гидробионтов водоемов Казахстана". Изд-во "Наука", Алма-Ата, 1973.

3. Некоторые особенности накопления цезия-137 пресноводными

растениями в природных условиях. Материалы 3-й научной конференции молодых ученых АН КазССР, изд-во "Наука", 1975.

4. Цезий-137 в донных отложениях водоемов Балхаш-Алакольского бассейна. В сб. "Экология гидробионтов водоемов Казахстана", т.2. (Совместно с С.А.Мордухович). (в печ.).

5. Цезий-137 в зоопланктоне водоемов Балхаш-Алакольского бассейна. В сб. "Экология гидробионтов водоемов Казахстана", т.2 (в печ.).

Материалы диссертации доложены на симпозиуме по радиозэкологии водных организмов, Рига, апрель 1972.

Подписано в печать 4/III-75 г. УГ Q1910. Формат бумаги 60x84 1/16
Заказ 670. Тираж 300.

Отпечатано на ротапринтере в типографии № 18 Госкомитета по делам
издательства, полиграфии и книжной торговли Казахской ССР.
г. Алма-Ата, ул. Утепова, 23.