

Joint Institute for Nuclear Research

**MODERN PROBLEMS OF GENETICS,
RADIOBIOLOGY, RADIOECOLOGY
AND EVOLUTION**

*Proceedings of the Second International Conference
dedicated to the 105th anniversary of the birth
of N. W. Timofeeff-Ressovsky and the 70th anniversary
of the paper «On the Nature
of Gene Mutations and Gene Structure»
by N. W. Timofeeff-Ressovsky, K. Zimmer, and M. Delbrück*

Yerevan, September 8–11, 2005

Volume 2

Dubna • 2007

Объединенный институт ядерных исследований



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕТИКИ, РАДИОБИОЛОГИИ, РАДИОЭКОЛОГИИ И ЭВОЛЮЦИИ

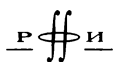
*Труды второй международной конференции,
посвященной 105-й годовщине со дня рождения
Н. В. Тимофеева-Ресовского и 70-летию публикации
статьи Н. В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера и
М. Дельбрюка «О природе генных мутаций и структуре
гена»*

Ереван, 8–11 сентября 2005 г.

Том 2

Дубна • 2007

УДК 577.391(042+091)
ББК 28.071.2я434+28.081.28я434
С56



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту № 07-04-07073.

Под общей редакцией **В. Л. Корогодиной,**
А. А. Чиньи, М. Дуранте
Составитель **В. Л. Корогодина**

Использованы документы и фотографии из личных архивов
В. И. Корогодина, В. В. Бабкова, С. Н. Куликова.
Обложка *В. Л. Корогодиной, Б. В. Флорко*

Editors: **V. L. Korogodina, A. A. Cigna, M. Durante**
Composed by **V. L. Korogodina**
Documents and pictures from the personal archives of
V. I. Korogodin, V. V. Babkov, S. N. Kulikov.
Title page design by *V. L. Korogodina, B. V. Florko*

Современные проблемы генетики, радиобиологии, радиоэкологи-
С56 гии и эволюции: Труды второй международной конференции, посвя-
щенной 105-й годовщине со дня рождения Н. В. Тимофеева-Ресовского и 70-летию публикации статьи Н. В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера и М. Дельбрюка «О природе генных мутаций и структуре гена» / Под общ. ред. В. Л. Корогодиной, А. А. Чиньи, М. Дуранте; Сост. В. Л. Корогодина. — Дубна: ОИЯИ, 2007. — Т. 2. — 154 с., 9 с. фото.

ISBN 5-9530-0165-7

Второй том сборника содержит воспоминания, материалы о Н. В. Тимофееве-Ресовском, документы из личных архивов. Публикуются научные биографии, списки основных научных трудов генетиков и радиобиологов, радиоэкологов Н. В. Куликова, А. Н. Тюрюканова, В. В. Бабкова, В. А. Ратнера, Ю. Г. Капульцевича, П. Д. Усманова, Д. М. Спитковского, В. А. Шевченко, В. И. Корогодина, статья, посвященная режиссеру фильмов о Н. В. Тимофееве-Ресовском Е. С. Саканян.

Книга содержит фотографии Н. В. Тимофеева-Ресовского и других ученых.

Издание представляет интерес для широкого круга читателей.

УДК 577.391(042+091)
ББК 28.071.2я434+28.081.28я434

© Объединенный институт ядерных исследований, 2007
© Корогодина В. Л., составление, 2007

ISBN 5-9530-0165-7

ВКЛАД Н.В. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКОГО В СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**И.В. МОЛЧАНОВА, Е.Н. КАРАВАЕВА,
А.В. ТРАПЕЗНИКОВ**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
e-mail: molchanova_i_v@mail.ru*

Резюме: Анализируется вклад выдающегося русского ученого Н.В. Тимофеева-Ресовского в становление и развитие радиэкологии. Оцениваются основные достижения Н.В. Тимофеева-Ресовского и его последователей на разных этапах радиэкологических исследований.

Ключевые слова: биосфера, радиэкология, биогеоценоз, радионуклид.

Введение

В 2005 г. исполнилось 105 лет со дня рождения великого русского ученого-естествоиспытателя Н.В. Тимофеева-Ресовского и 50 лет созданной им лаборатории биофизики, ныне Отделу континентальной радиэкологии ИЭРиЖ УрО РАН. История становления и развития радиэкологии в нашей стране неотделима от общей истории естествознания. Особую роль в ее формировании играет учение В.И. Вернадского о живом веществе и биосфере Земли. Идея об организованности биосферы получила блестящее развитие в трудах В.Н. Сукачева, а оценка результатов геохимической деятельности живых организмов является составной частью учения о биогеохимии и геохимии ландшафтов. В основе этих научных концепций, предворяя их хронологически, лежит генетическое почвоведение, основоположником которого является В.В. Докучаев. Создавая науку о почве, В.В. Докучаев подчеркивал ее естественно-историческое происхождение, а среди факторов почвообразования особо выделял фактор времени, участвующий в создании уникального тела природы.

Заслуга в синтезе и подведении итогов периода развития докучаевской школы принадлежит Н.В. Тимофееву-Ресовскому. Он первый подчеркнул

единую позицию этих выдающихся естествоиспытателей в понимании природы и задач общего естествознания. Именно с этих, естественно-исторических, биосферных позиций он подошел к формированию в середине прошлого века основ новой научной дисциплины – радиационной биогеоценологии или, как ее впоследствии стали называть, – радиэкологии. Инициировало ее становление непрерывно возрастающее поступление в биосферу Земли естественных и искусственных радионуклидов. Они высвобождались в ходе широкомасштабных испытаний ядерного оружия, в процессе развития атомной промышленности и энергетики. Мировому научному сообществу стало ясно, что сформировался новый глобально действующий экологический фактор – техногенные радионуклиды и порождаемые ими ионизирующие излучения. Эволюция представлений о роли радиационного фактора происходила на стыке целого ряда наук – экологии, агрохимии, геохимии, гидробиологии, ядерной и атомной физики. «Такой способ формирования новых научных дисциплин может привести к гетерозису: на стыке наук за счет оплодотворяющего влияния научных дисциплин – рождается качественно новая наука», – отметил Р.М. Алексахин (2000). Как правило, развитие новой научной дисциплины нуждается в творчестве «личностей-мыслителей», идеи которых создают фундамент для будущих дел. Фактически у истоков радиэкологии стоят две такие выдающиеся личности, как Н.В. Тимофеев-Ресовский и В.М. Ключковский. Символично, что оба они ровесники века, оба в 1940-50-х гг. работали и создавали научные школы на Урале, где зарождался отечественный атомный проект. Отдавая должное светлой памяти этих ученых, сегодня будем говорить в основном о Н.В. Тимофееве-Ресовском.

История радиэкологических исследований

В послевоенные годы Николай Владимирович в качестве заключенного, прошедшего Бутырку и Карлаг, руководил отделом в одном из “закрытых” городов на Южном Урале. После освобождения в 1955 г. он вместе с группой сотрудников был переведен в Институт биологии в г. Свердловск (ныне Институт экологии растений и животных УрО РАН). Находясь у истоков создания атомного проекта, он уже тогда очертил весьма серьезную проблему быстрого и полного изучения всех вопросов, связанных с возможностью воздействия на биосферу интенсивно развивающейся атомной промышленности. Пропагандируя идеи великих предшественников, а также учитывая опыт вековых наблюдений за губительными воздействиями на окружающую среду промышленных отходов, он подчеркивал, что «любая, достаточно

широкая проблема о воздействии человека и его промышленной деятельности на окружающую природу должна ставиться на основе созданного В.И. Вернадским общего учения о биосфере и биогеоценотических идей В.Н. Сукачева».

На первом этапе под руководством Н.В. Тимофеева-Ресовского, работавшего азартно, оптимистично, всеохватно, были проведены многочисленные опыты. Радионуклиды рассматривались как «меченые атомы» для изучения судьбы химических элементов в различных компонентах биосферы, а ионизирующая радиация – в качестве удобного и легко дозируемого фактора воздействия на организмы и их сообщества. Работы, спланированные в соответствии с методологией научных построений автора, технически доступные в исполнении, проводились с широким набором радионуклидов на упрощенных системах раствор–почва–раствор, вода–грунт, вода–гидробионты. Рассмотрение таких простых систем начиналось с выделения и изучения в них причинно-следственных связей. В простой системе их число не велико, они в ней резче проявляются и более доступны для изучения. Результаты таких исследований позволили Тимофееву-Ресовскому и др. (1966) провести классификацию радионуклидов по типу поведения в первичных экологических звеньях и выявить основные факторы и механизмы, управляющие их миграционной способностью.

Концентрируя внимание на биогеоэкологическом исследовании водоемов, Николай Владимирович подчеркивал, что «в отличие от суши, где особое значение имеет почвообразование и взаимоотношение между почвами и стоком, в водоемах особую роль играет концентрация элементов в донных отложениях. Она зависит от условий втока, климата, характера биологической продуктивности и состава биоценозов водоема», Тимофеев-Ресовский (1962). Этот тезис был подтвержден серией работ. В них детально рассматривалось общее распределение вносимых в воду радионуклидов по основным компонентам водоема: воде, грунтам, биомассе; накопление различных радиоактивных элементов представителями пресноводных животных и растений; снижение радиоактивности воды при прохождении ее через слабопроточные водоемы. Ключевая роль в этих исследованиях принадлежала Е.А. Тимофеевой-Ресовской (1963). Нельзя не подчеркнуть особую значимость этих работ в связи с чисто практическими вопросами, связанными с очисткой воды от радиоактивных загрязнений. В целом феноменологические работы гидробиологической направленности, выполненные на первом этапе, наметили общие контуры радиоэкологии пресноводных водоемов, которая в настоящее время успешно развивается учениками и последователями Н.В. Тимофеева-Ресовского.

В работах того периода существенное место отводилось изучению роли живых организмов в накоплении радионуклидов. Для количественной оценки и сравнения накопительной способности организмов широко использовался формальный критерий – коэффициент накопления, представляющий отношение концентраций данного радионуклида в организме и окружающей среде в условиях равновесия. Было показано, что пределы накопления радионуклидов чрезвычайно широки как для разных видов, так и для разных элементов. Виды, характеризующиеся наиболее высокими коэффициентами накопления, были названы специфическими накопителями, а для их вычленения был предложен объективный критерий – отклонение коэффициента накопления более чем на 4 сигмы от среднего значения, установленного для соответствующего вариационного ряда. В плане поиска и выделения “концентраторов” радионуклидов особенно подчеркивалась роль организмов – пионеров образования коры выветривания и формирования первичных почв – бактерий, грибов, водорослей, лишайников. В последующем такие организмы – специфические накопители того или иного радионуклида – стали использовать в качестве биоиндикаторов радиоактивного загрязнения природных экосистем. Благодаря этим исследованиям позднее сформировалось оригинальное научное направление – лихено- и бриоиндикация окружающей среды, в число задач которого входило слежение за состоянием природных экосистем в зонах высокой техногенной нагрузки. Преимущество такого мониторинга состоит в том, что высокая концентрирующая способность и высокая чувствительность живых организмов к присутствию в среде ряда загрязнителей позволяют исключить трудоемкие работы по анализу компонентов экосистем с более низким содержанием в них поллютантов.

Кроме того, в 50-60-е гг. прошлого века были проведены многочисленные эксперименты по изучению сравнительной радиочувствительности более ста видов и сортов растений. На большом фактическом материале подтверждено стимулирующее действие радиации на рост и развитие растений; сделана первая попытка объяснения этого явления. Опытами с искусственными сообществами наземных растений и с пресноводным перифитоном было показано, что при относительно малых дозах лучевого воздействия имеется некоторая стимуляция этих сообществ без заметной их перестройки. При высоких дозах облучения происходят глубокие нарушения видового состава сообществ и их структуры, Тимофеев-Ресовский (1956, 1957).

Огромный, казалось разрозненный, аналитический материал, полученный в те же годы в лаборатории Н.В. Тимофеева-Ресовского, был им проанализирован концептуально и в форме доклада по совокупности

работ представлен к защите диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. В этой работе была изложена квинтэссенция взглядов автора на новую область знаний, создана ее общая платформа и очерчен круг задач, которые и сегодня остаются актуальными. Их можно свести к изучению закономерностей миграции, распределения и биологического действия радиоактивных веществ в различных биогеоценозах (экосистемах), созданию научных основ прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения биосферы, экологического нормирования этих загрязнений в компонентах природной среды и ослабления их вредных воздействий.

Осенью 1957 г. в результате аварии на ПО «Маяк», названной впоследствии Кыштымской, в окружающую среду было выброшено около 74 ПБк радиоактивных веществ. На местности образовался радиоактивный след, получивший название восточно-уральского. Он представлял уникальный полигон для проведения радиоэкологических исследований. С этой целью в 1958 г. при непосредственном участии В.М. Ключковского была организована Опытная научно-исследовательская станция (ОНИС) химкомбината «Маяк». В.М. Ключковский оставался бессменным научным руководителем и координатором работ, проводившихся на опытной станции под грифом строгой секретности. Позднее, в 1974 г. за цикл радиоэкологических исследований группе ученых во главе с В.М. Ключковским была присуждена Государственная премия.

К сожалению, Н.В. Тимофееву-Ресовскому не было позволено возглавить работы по оценке последствий этой радиационной аварии. Отстраненный от этих дел Николай Владимирович, переживший глубокое разочарование, с присущими ему фундаментальностью и размахом продолжал открытые работы по затронутой проблематике в стенах Института биологии УФАН СССР (г. Свердловск) и на биостанции «Миассово». Предвидя возможность глобальных масштабов загрязнения окружающей среды, он в общей проблеме воздействия атомной промышленности на биосферу выделяет три наиболее важных вопроса:

- изучение судьбы радионуклидов, попадающих в различные биогеоценозы, а именно путей и «размерностей» их миграции из центров загрязнений;
- изучение действия ионизирующих излучений на живые организмы;
- разработку различных мероприятий по борьбе с вредными радиоактивными загрязнениями.

При этом он ясно показывает, что «вся проблема защиты биосферы и все вопросы по разработке частных мероприятий по охране природы являются проблемой биогеоэкологической. Для ее решения необходимо

внедрять, особенно в промышленно-технические круги, современные представления о биосфере нашей планеты и о биогеохимических процессах», Тимофеев-Ресовский (1962).

Грандиозный биогеохимический круговорот веществ, в который включаются и поступающие в биосферу радионуклиды, обусловлен как взаимодействием живых организмов между собой и косными компонентами среды, так и взаимодействиями между собой живых сообществ, более или менее самостоятельных объектов природной среды. Такими объектами, согласно концепции об уровнях организации жизни, являются биогеоценозы – элементарные единицы современной биосферы, Тимофеев-Ресовский и Тюрюканов (1966). Выделив биогеоценологический уровень организации жизни, Н.В. Тимофеев-Ресовский со своими учениками провел цикл работ по количественной оценке распределения широкого спектра радионуклидов в компонентах природных биогеоценозов. Уже в тех работах была оценена роль лесной подстилки, надземной массы и корневых систем растений, особенностей самих радионуклидов в их судьбе в биогеоценозе. Увлеченность Николая Владимировича количественными исследованиями позволила ему несколько позднее развернуть работы в области математического моделирования радиационно-экологических процессов. Была поставлена и успешно решена задача уменьшения радиационного воздействия загрязненных биогеоценозов на человека путем изменения их структуры. Эти модели нашли дальнейшее развитие в сельскохозяйственной радиоэкологии и при описании глобальных процессов, возникающих в земной атмосфере при ядерных взрывах.

Такие взрывы при широкомасштабном испытании ядерного оружия в 60-х гг. прошлого века привели к радиоактивному глобальному загрязнению компонентов наземных и водных экосистем. В исследовании природных систем, как бы дополняя редуциционно-аналитический принцип, нашел широкое применение системный подход. Системный анализ исходит из того факта, что объекты рассматриваемой совокупности, обладая известной независимостью, определенным образом связаны между собой. Эта связь может осуществляться, например, через геохимический поток веществ. С этой точки зрения Н.В. Тимофеев-Ресовский рассматривал миграцию веществ в цепях биогеоценозов как серию сопряженных процессов рассеяния и концентрирования их в организмах, почвах, водах, грунтах, атмосфере. В дальнейшем на этой основе были разработаны принципы и методы радиоэкологических ландшафтно-геохимических исследований. Они заключаются в выделении определенных участков ландшафта (водоразделы, склоны, речные долины, заболоченные понижения), локализующихся на сопряженных по

стоку элементах рельефа, и выявлении путей и темпов миграции в них химических элементов и радионуклидов. С использованием системного ландшафтно-геохимического подхода были получены первые сведения об уровнях загрязнения почвенно-растительного покрова в пределах границ бывшего Советского Союза (Тюрюканова (1968); Павлоцкая (1974); Алексахин, Нарышкин (1977)). Были выявлены зоны рассеяния и вторичной аккумуляции радионуклидов в природной среде; оценено влияние локальных экологических условий на скорость миграции и поступление радионуклидов через пищевые цепочки в организм человека (Рассел (1971); Тюрюканова (1974); Моисеев, Рамзаев (1975)). Разработана методология исследований пресноводных экосистем и проведена количественная оценка распределения радионуклидов по их основным компонентам (Трапезников, Трапезникова (1979); Куликов, Чеботина (1988); Чеботина и др. (1992)).

Накопление информации, свидетельствующей о специфических особенностях поведения радионуклидов в той или иной среде обитания живых организмов, обусловило процесс дифференциации радиоэкологии и формирования в ней целого ряда самостоятельных научных направлений: сельскохозяйственной, лесной, пресноводной, морской радиоэкологии. Каждое из этих направлений решает свои задачи и имеет свои особенности. На основе фундамента, заложенного Н.В. Тимофеевым-Ресовским, с использованием обширного экспериментального материала в 1970-х гг. была сформулирована концепция континентальной радиоэкологии как радиоэкологии наземных экосистем и внутренних водоемов. При этом было подчеркнуто (Куликов, Молчанова (1981)), что природную среду нельзя рассматривать в качестве пассивного разбавителя радиоактивных загрязнений. Концентрации радионуклидов в отдельных звеньях экосистем могут оказаться весьма высокими. Так, многие гидробионты и представители низших растений аккумулируют в себе радионуклиды в количествах, превышающих их содержание в среде на порядки величин.

Фактически только после Чернобыльской аварии широкой научной общественности стали доступны ранее “закрытые” многочисленные результаты изучения загрязненных территорий Уральского региона. Была разработана “Государственная программа РФ по радиационной реабилитации Уральского региона”, в разработке которой принимал участие д.б.н А.В. Трапезников. В рамках этой программы были развернуты крупномасштабные радиоэкологические исследования на территории Свердловской, Челябинской и Курганской административных областей. В исследованиях принимали активное участие сотрудники Отдела континентальной радиоэкологии – преемника лаборатории,

которой руководил Н.В. Тимофеев-Ресовский. Были верифицированы уровни содержания и, с использованием математических моделей, оценены интегральные запасы радионуклидов в компонентах наземных экосистем и пресноводных водоемов, испытывающих многолетний прессинг радиоактивного загрязнения. Особое значение имеют результаты изучения трансконтинентального переноса техногенных радионуклидов в пойменно-речных системах Обь-Иртышского бассейна (Трапезников et al. (1993); Трапезников и др. (2005a); Трапезников и др. (2005b)).

Заключение

Глобальный характер Чернобыльской аварии высветил проблему, на которой был сконцентрирован творческий потенциал Н.В. Тимофеева-Ресовского, - проблему «биосфера и человечество». Формулировка и исследование этой проблемы поставили Николая Владимировича в ряд великих представителей русской, национальной естественно-исторической мысли. Современное человечество сталкивается с необходимостью строить свою деятельность с учетом параметров, определяющих стабильность биосферы в условиях эскалации техногенной нагрузки. На поддержание стабильности биосферы направлена экологическая доктрина России, включающая “концептуальное положение о необходимости не только знать все болевые точки планеты, но и выработать стратегию международного трансрегионального сотрудничества в деле их системной защиты”, Черешнев (2002).

Н.В. Тимофеев-Ресовский создавал радиационную биогеоценологию как науку о закономерностях поведения радионуклидов в биосфере. Теперь задачи радиэкологии органично вплетаются в сформулированную им глобальную проблему «биосфера и человечество». Её приоритетность (биосферный императив поведения человечества) – главное научное завещание, оставленное нам великим ученым.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (гранты №04-05-64172-а, № 04-05-96086) и при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ), грант № 2841.

Литература

- Алексахин, Р.М., 2000, У истоков отечественной радиоэкологии (О научном творчестве и наследии Н.В. Тимофеева-Ресовского и В. М. Клечковского). Обнинск, с. 11-20.
- Алексахин, Р.М., и Нарышкин, М.А., 1977, *Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах*, Наука, Москва, с. 141.
- Куликов, Н.В., и Молчанова И.В., 1981, *Континентальная радиоэкология*, Plenum Press и Наука, Москва, с. 174.
- Куликов, Н.В., и Чеботина, М.Я., 1988, *Радиоэкология пресноводных экосистем*, Уральское отделение Академии наук СССР, Свердловск, с. 129.
- Моисеев, А.А., и Рамзаев, П.В., 1975, *Цезий-137 в биосфере*, Атомиздат, Москва, с. 182.
- Павлоцкая Ф. И., 1974, *Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах*, Атомиздат, Москва, с. 215.
- Рассел Р., ред., 1971, *Радиоактивность и пища человека*, Атомиздат, Москва, с. 373.
- Тимофеев-Ресовский, Н.В., 1957, Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии, *Ботанический журнал*. **42**:161-194.
- Тимофеев-Ресовский, Н.В., 1962, *Некоторые проблемы радиационной биогеоценологии*, Доклад на соискание ученой степени доктора биологических наук, Свердловск, с. 53.
- Тимофеев-Ресовский, Н.В., и Порядкова, Н. А., 1956, О радиостимуляции растений, *Ботанический журнал*. **41**:1620-1623.
- Тимофеев-Ресовский, Н.В., Титлянова, А.А., Тимофеева, Н.А., и др., 1966, Поведение радиоактивных изотопов в системе почва–раствор, в книге: *Радиоактивность почв и методы ее определения*, Наука, Москва, с. 46-80.
- Тимофеев-Ресовский, Н.В., и Тюрюканов, А.Н., 1966, Об элементарных биохорологических подразделениях биосферы, *Бюл. МОИП*. **72**:123-132.
- Тимофеева-Ресовская, Е.А., 1963, *Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов*, УФАН СССР, Свердловск, с. 78.
- Трапезников, А.В., и Трапезникова, В.Н., 1979, О накоплении ⁶⁰Со пресноводными растениями в природных условиях, *Экология*. № 2, с. 104-106.
- Трапезников, А.В., Николкин, В.Н., Трапезникова, В.Н., и др., 2005 а, Радиоэкологическое исследование р. Оби и её пойменных грунтов, в книге: *Медицинские и экологические аспекты ионизирующего облучения*, Северск – Томск, с. 207-208.
- Трапезников, А.В., Трапезникова, В.Н., Коржавин, А.В., и др., 2005б, Сравнительная оценка годовых стоков радионуклидов в рр. Обь и Иртыш, там же, с. 209-210.
- Тюрюканова, Э.Б., 1968, *К методике исследования поведения радиоактивного стронция в почвах различных геохимических ландшафтов*, Атомиздат, Москва, с. 25.
- Тюрюканова, Э.Б., 1974, *Радиогеохимия полей Русской равнины: (На прим. Мещерской низменности)*, Наука, Москва, с. 156.
- Чеботина, М.Я., Трапезников, А.В., Трапезникова, В.Н., и Куликов, Н.В., 1992, *Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища*, УрО АН СССР, Свердловск, с. 80.
- Черешнев, В.А., 2002, Экологическая доктрина России: от замысла к пилотным проектам, *Известия Уральского государственного университета*. **23**:6-22.
- Trapeznikov, A. V., Pozolotina, V.N., Chebotina, M.Ya., et al., 1993, Radioactive contamination of the Techa river, the Urals, *Health Phys.* № 65, p. 481-488.