

хронологии в совокупности позволяют ставить на разрешение задачи любой сложности.

В Радиевом институте в ходе работ сложились коллективы исследователей с большими творческими замыслами, высоким экспериментальным мастерством и оригинальными направ-

лениями исследований. Установлены теснейшие контакты со многими научными и производственными организациями, вместе с которыми в настоящее время решаются многие вопросы первостепенной важности.

Радиоактивность внешней среды

Л. И. ГЕДЕОНОВ

Задачи исследования

Чистота биосферы Земли находится под угрозой вследствие нарушения экологического равновесия, связанного с деятельностью человека. На IV Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии было отмечено, что удовлетворение потребностей человечества в энергетике за счет сжигания обычного топлива (уголь, нефть, газ, сланцы, торф) привело бы к 2000 г. к экологической катастрофе на всем земном шаре: образование опасной концентрации углекислоты в атмосфере, недопустимое изменение рН атмосферных осадков, возникновение опасных концентраций аэрозолей, отравление атмосферы и водоемов сернистыми соединениями, загрязнение водных поверхностей нефтью. Сохранить чистоту внешней среды можно только путем немедленного перехода к ядерной энергетике. Необходимо, чтобы к 2000 г. 50% мировой потребности в энергии покрывались бы за счет энергии деления ядер, а в начале XXI века — перейти к промышленному использованию энергии слияния ядер.

Неотложность решения этой задачи ясна как ученым, так и правительствам, однако общественность во многих странах настроена против развития ядерной энергетике. Это обусловлено тем, что население еще не осознало причин и истинных размеров угрозы экологической катастрофы; кроме того, человечество напугано преувеличенным страхом перед радиационной опасностью.

В действительности, работа АЭС, отходы атомной и радиохимической промышленности не вызвали в глобальных масштабах такой опасности, которую представляют продукты сгорания обычного топлива. Глобальные радиоактивные загрязнения среды продуктами испытаний ядерного оружия по своим масштабам также менее опасны, чем продукты сгорания.

Еще до использования ядерной энергии было известно, что осколки деления и наведенная радиоактивность представляют большую опасность. Поэтому при создании АЭС, а также в атомной и радиохимической промышленности заранее были предусмотрены меры предосторожности. Исключением явились ядерные взрывы в атмосфере, воде и космосе, в результате которых огромные количества радиоактивных веществ были высвобождены в окружающую среду. Выполнение условий Московского договора (1963 г.) о запрещении ядерных испытаний в трех средах основными ядерными державами приостановило интенсивный рост глобального радиоактивного загрязнения, однако полностью это загрязнение не ликвидировано.

В создавшейся ситуации специалисты по радиоактивности внешней среды используют при отсутствующие в ней радиоактивные вещества для изучения закономерностей их распространения с целью контроля и выработки мер предотвращения радиационной опасности [1—4].

Присутствующие во внешней среде радиоактивные примеси используются не только для санитарных разработок, но и для познания природных геофизических и геохимических процессов, многие из которых нередко имеют огромное значение в энергетическом балансе планеты, формировании погоды и климата, почвообразовании, развитии биогеоценозов, урожайности, а также при решении проблем больших городов [5—7].

В Радиевом институте им. В. Г. Хлопина решались задачи контроля за радиоактивностью внешней среды и проблемы обеспечения радиационной безопасности. При этом большое значение придавалось разработке методик исследования радиоактивности внешней среды, особенно разработке радиохимических методик определения отдельных изотопов, имеющих большое практическое значение.

Основные объекты исследования

Изучение радиоактивных веществ искусственного происхождения, содержащихся в различных объектах внешней среды, начато в Радиовом институте с 1953 г. Основным местом наблюдения является радиометрическая станция в Зеленогорске (близ Ленинграда). Кроме того, отбор материала для исследований производится многочисленными экспедициями по всей территории Советского Союза и в Мировом океане [8, 9].

Определяется концентрация 12—15 радионуклидов в аэрозолях приземного слоя воздуха (в последнее время стало возможным определение более 30 нуклидов), удельная активность некоторых радионуклидов в атмосферных осадках (дождь, снег), а также поверхностная плотность выпадения и запас, накапливающийся на земной поверхности [6, 10]. Исследуется влияние растительности на процесс выпадения радиоактивных продуктов из атмосферы [7, 11], изучается радиоактивное загрязнение почвы [11].

Выполняются работы по измерению активности радионуклидов в поверхностных водах суши, морях, океанах и в донных отложениях. Проводятся наблюдения за миграцией, сорбцией, десорбцией и другими процессами в горных породах, в которых могут быть захоронены радиоактивные отходы.

Анализируется характер депонирования радиоактивных нуклидов в различных объектах внешней среды. Разрабатываются методики и критерии, необходимые для массового анализа, решаются возникающие при этом химические проблемы, связанные с препаративными целями, вопросы комплексобразования и химической кинетики.

Радиоактивные примеси приземного воздуха, самоочищение и обмен воздушных масс

Концентрация Cs^{137} , Ru^{106} , Ce^{144} , Zr^{95} , Nb^{95} , Ce^{141} , La^{140} , Ba^{140} изучается непрерывно с 1959 г. Радиохимический анализ позволяет определять $\text{Pu}^{238+240}$, Pu^{238} и другие изотопы плутония в количествах, характеризующихся активностью, равной 50 расп/мин на 1 г навески, Sr^{90} и Cs^{137} — 10^{-13} кюри/л воды; Cs^{137} и Ce^{144} — 10^{-15} кюри/ м^3 воздуха. Результаты для Cs^{137} , усредненные помесячно, представлены на рис. 1.

Найдено, что изменение концентрации долгоживущих радионуклидов в приземном слое воздуха со временем может быть выражено эмпирической формулой

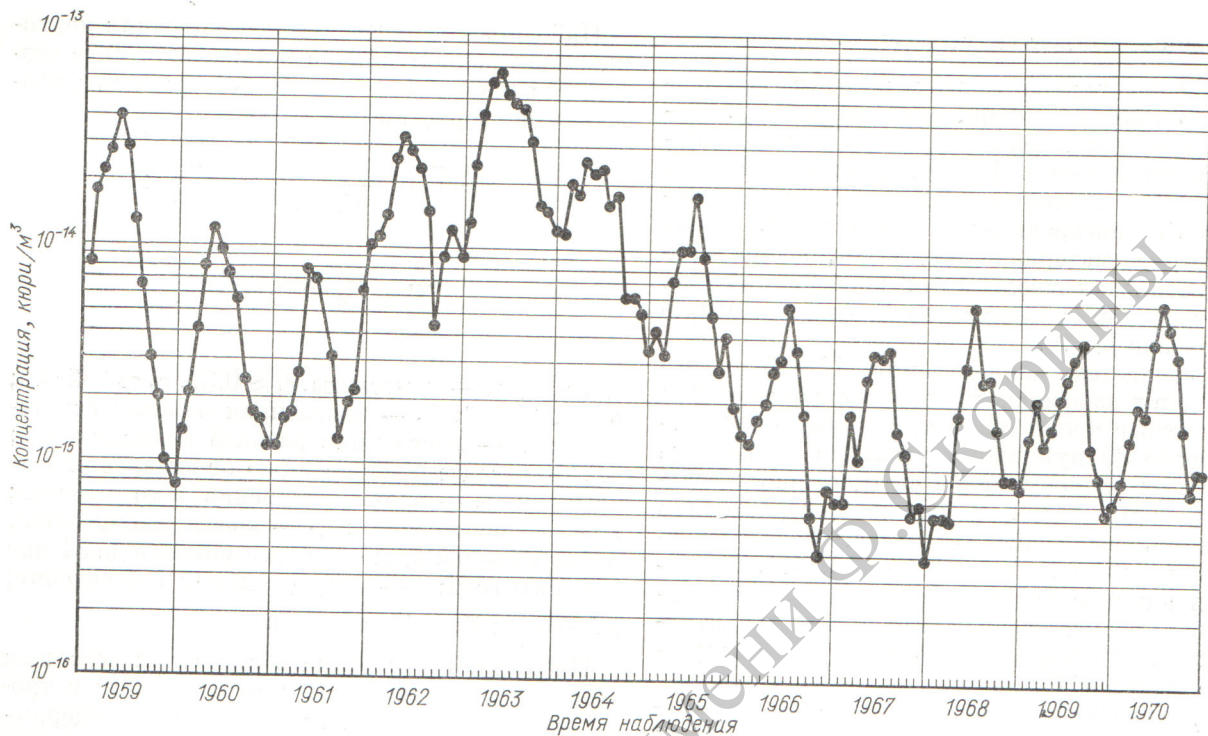
$$\rho = \left[c_1 + \frac{c_2}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma^2}} \right] \times \\ \times \sum_{k=1}^n M_k e^{-(t-t_k)(\lambda_c + \lambda)},$$

где c_1 , c_2 и σ — константы, $c_1 \approx 0,37$, $c_2 \approx 262$ дня; $\sigma \approx 60$ дней; λ_c — постоянная очистки стратосферы; λ — постоянная распада радионуклида; M_k — вклад в концентрацию от внедрения k -го изотопа; t_k — время внедрения k -го изотопа; i — год наблюдения; t_i — время наблюдения, отсчитываемое от начального момента до 31 мая каждого года; t — текущее время наблюдения; $\lambda_c = \frac{0,693}{T_c}$; $T_c \approx 11$ месяцев.

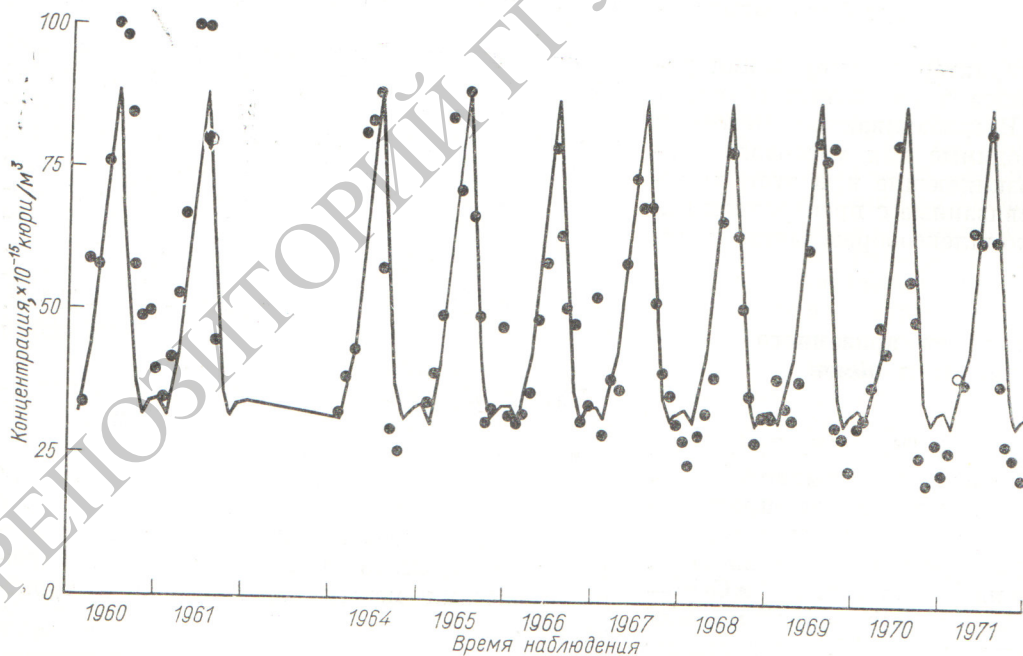
Наблюдаемая картина объясняется сезонным обменом вещества между стратосферой и тропосферой и очисткой стратосферы до содержащегося в ней запаса радиоактивных изотопов. Для Be^{-7} аналогичная закономерность носит иной характер (рис. 2). По этим зависимостям можно оценить скорость очистки тропосферы.

Величина отношения концентраций различных пар радионуклидов позволяет судить об источниках поступления осколочных продуктов в стратосферу (рис. 3). Исследование темпа выпадения радиоактивных осадков на земную поверхность дает возможность оценить условную скорость оседания и так называемую эффективную высоту очистки $H_{\text{эфф}}$. В те дни, когда бывают осадки, величина $H_{\text{эфф}}$ составляет 3000—4000 м, без осадков — 300—400 м. Наблюдаемые значения $H_{\text{эфф}}$ сопоставляются с синоптическими метеоданными.

Таким образом, измерения содержания стратосферных радиоактивных примесей в приземном слое атмосферы позволили найти количественное соотношение для прогнозирования радиоактивной загрязненности воздуха после выброса продуктов ядерного взрыва в стратосферу и оценить годовой обмен воздушными массами между стратосферой и тропосферой.



Р и с. 1. Среднемесячная концентрация Cs^{137} в приземном воздухе близ Ленинграда в 1959—1970 гг.



Р и с. 2. Среднемесячная концентрация Be^7 в приземном воздухе близ Ленинграда в 1960, 1961 и 1964—1971 гг.

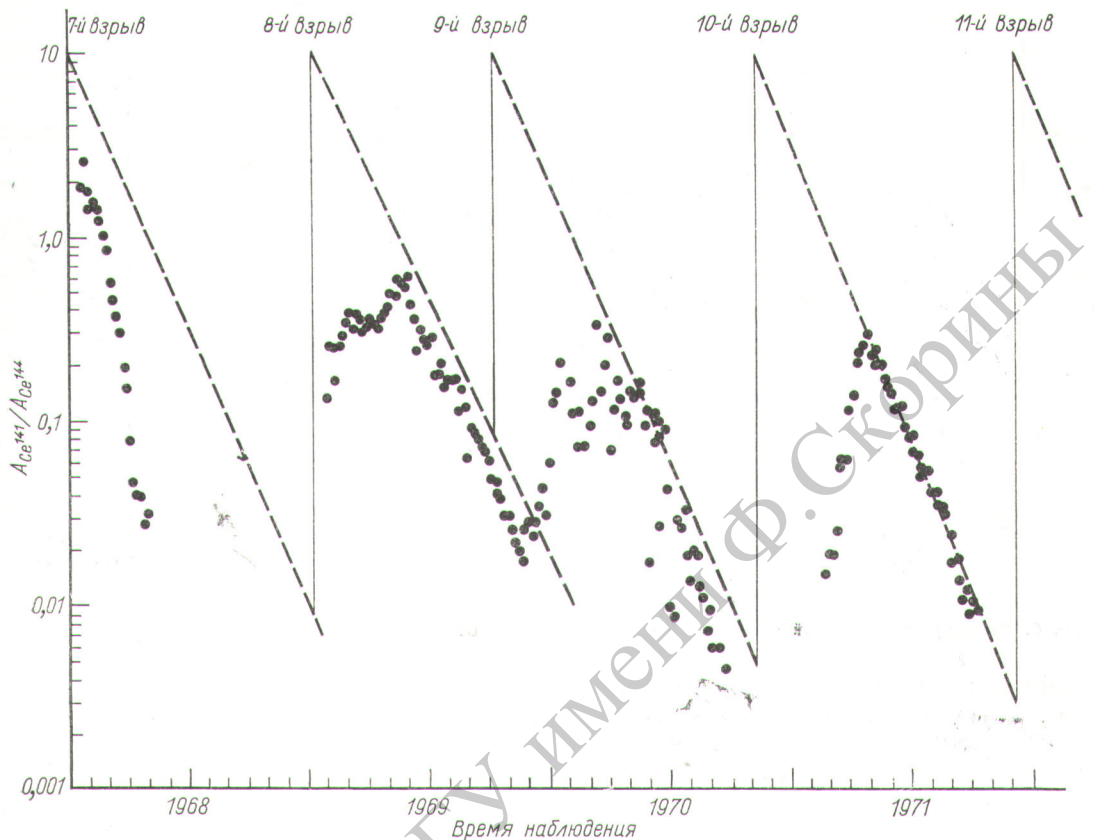


Рис. 3. Отношение концентрации Ce^{141} и Ce^{144} в приземном воздухе близ Ленинграда в 1968–1971 гг.

Концентрация радиоактивных примесей в атмосферных осадках и выпадение радиоактивных веществ на земную поверхность

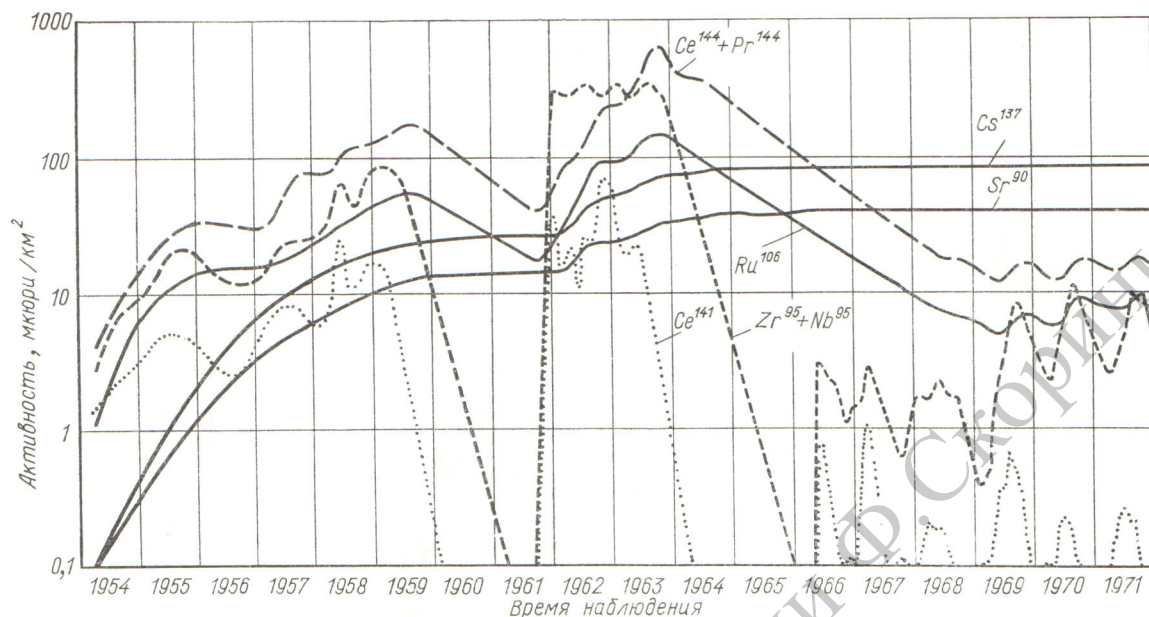
В воде атмосферных осадков концентрируются находящиеся в атмосфере аэрозоли, несущие радиоактивные примеси. Обычно в объемных единицах коэффициент концентрирования составляет в среднем 10^6 . В связи с этим осадки являются главным очищающим фактором тропосферы, обуславливающим основную часть радиоактивных выпадений.

Распределение радиоактивных нуклидов между взвесью и фильтратом дает дополнительную информацию о судьбе и формах нахождения изотопов. Баланс поступления и величины радиоактивного распада выпавших радиоактивных веществ позволяет оценить их количество на земной поверхности (рис. 4). Из данных рис. 4 следует, что радиоактивные загряз-

нения от ядерных взрывов оказались в некоторый момент времени сравнимыми с запасом радиоактивного калия, воздействующего на наземные организмы на единице площади земной поверхности. Интересно отметить, что до настоящего времени никакого вклада от атомной промышленности в радиоактивное выпадение в глобальном масштабе не отмечено.

Почва и растения. Выпавшее радиоактивное вещество не обязательно все остается на почве. Здесь имеют место сложные процессы, которые могут привести к перераспределению выпавшего вещества или к его вымыванию. Характеристика возникающих при этом различий показана на рис. 5. Распределение радиоактивных нуклидов по глубине и поверхности является основным предметом исследований радиоактивности почв.

Соотношение между содержанием в верхнем слое почвы цезия и стронция и глубиной выпавших атмосферных осадков на территории ЕТС от Ленинграда до Одессы и Сухуми ука-



Р и с. 4. Накопление на земной поверхности близ Ленинграда отдельных радионуклидов.

зывает на хорошую корреляцию между указанными величинами.

Найдено, что кумулятивное отложение Cs^{137} на земную поверхность можно задать приближенным соотношением

$$Q = A + B + C + D,$$

где A — содержание Cs^{137} в верхнем слое почвы толщиной 1 см; B — количество Cs^{137} , находящееся на растительности; C — количество Cs^{137} , ушедшее в глубь почвы; D — количество Cs^{137} , унесенное с места выпадения осадков водами и ветром. Исследование показало, что $A \approx C$; $B \approx 0,1Q$; $D \approx 0$.

Откуда

$$Q = 2,1 A.$$

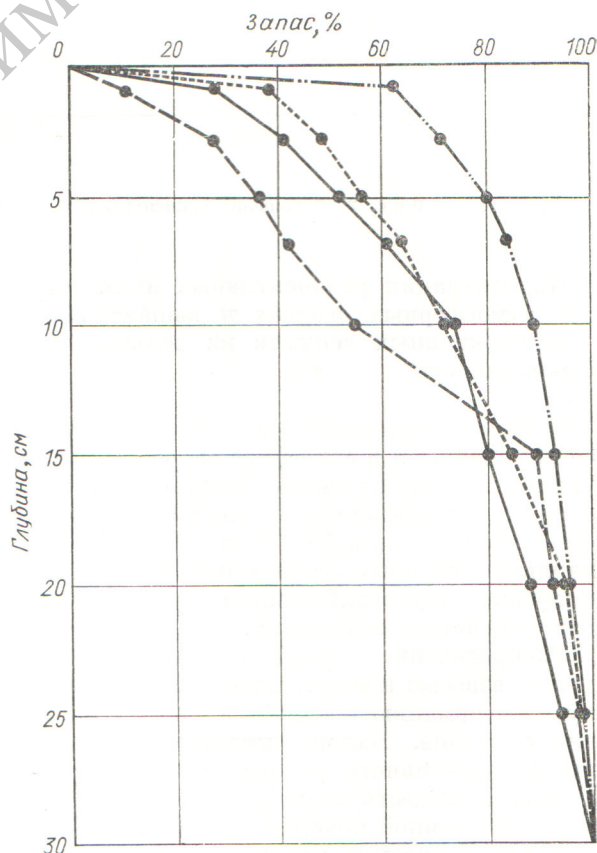
Сравнение с высотой осадков в разных пунктах ЕТС выявило следующую приближенную зависимость:

$$A \approx a + bh,$$

где h — высота осадков, мм; коэффициенты $a \approx 9$ мкюри/км² и $b = (0,07 \pm 0,02)$ мкюри/км².

Р и с. 5. Распределение запаса Sr^{90} по глубине в различных почвах (в отн. ед.):

— дерново-подзолистая супесчаная; — горно-луговая; — лугово-черноземная суглинистая; - - - дерново-подзолистая суглинистая.



Воды суши, морей и океанов. Исследования речной системы северо-запада ЕТС показали, что суммарная β -активность различных водоемов является наилучшим индикатором изменения уровня из загрязненности осколками деления в течение любого промежутка времени. Изменение содержания отдельных долгоживущих нуклидов (Cs^{137} , Sr^{90}) происходит значительно медленнее. Максимум радиоактивной загрязненности приходится на весенние паводки и начало летнего периода (сезонный максимум). В 1962—1963 гг. суммарная β -активность в некоторых водоемах Ленинградской области достигла $(2 \div 3) \cdot 10^{-10}$ кюри/л, т. е. была в 20—30 раз выше, чем в периоды «затишья». Отмечено равномерное распределение активности в р. Неве. Установлена значительная роль взвеси переноса радиоактивного вещества.

Большой объем исследований был посвящен распространению в морях и океанах Sr^{90} и Cs^{137} [12].

Заключение

Проводимое в течение многих лет в Радиовом институте изучение радиоактивного загрязнения различных сред биосферы позволило разработать методики исследования, широко применяемые в настоящее время.

Накоплено большое количество данных по распределению радиоактивных примесей в пространстве и изменению их концентраций во времени. Некоторые закономерности описаны математически, получено их объяснение с точки зрения геофизических и геохимических факторов.

В перспективе можно надеяться на нахождение и получение объяснения механизма процессов, обуславливающих наблюдаемые закономерности. Тогда появится возможность для

оценки предполагаемой радиационной опасности при загрязнении морей и океанов. Возможность наблюдать за находящимися в природе искусственными и естественными радиоактивными метками должна быть использована в качестве инструмента исследования геофизических и геохимических процессов.

Полученные данные и разрабатываемые методы обеспечения радиационной безопасности передаются странам-участницам СЭВ для дальнейшего использования при проектировании будущих АЭС и при переработке радиоактивных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Геденов. «Атомная энергия», 2, 260 (1957).
2. В. П. Шведов и др. «Атомная энергия», 5, 577 (1958).
3. В. П. Шведов, Л. И. Геденов. Советские ученые об опасности испытаний ядерного оружия. М., Атомиздат, 1959.
4. Радиоактивные загрязнения внешней среды. Под ред. В. П. Шведова и С. И. Широкова. М., Атомиздат, 1962.
5. Л. И. Геденов, М. И. Жилкина. Выпадение продуктов деления в окрестностях Ленинграда в 1957—1965 гг. Документ ООН А/АС, 82/G/L, 1172 (1967).
6. Л. И. Геденов и др. «Атомная энергия», 23, 358 (1967).
7. Л. И. Геденов, С. П. Росянов. «Почвоведение», № 7 (1968).
8. В. И. Баранов и др. (СССР). III Женевская конференция (1964), доклад P-384.
9. В. М. Вдовенко и др. «Disposal of Radioactive Wastes into Seas Oceans and Surface Waters», Proceedings of a Symposium. Vienna, IAEA, 1966.
10. С. П. Росянов и др. «Радиобиология» (Информ. бюл. АН СССР), № 13, 40 (1971).
11. С. П. Росянов и др. Приборы и методы изучения загрязнения внешней среды. Труды ИЭМ. Вып. 2. Л., Гидрометеоиздат, 1970, стр. 37.
12. В. М. Вдовенко и др. «Атомная энергия», 31 409, (1971).