

22. Ганул М.Н., Кучин Н.Л., Сергеев Н.В. и др. О контрольных концентрациях техногенных радионуклидов в морской воде. — Экологическая химия. 1999, т. 8, вып. 3, с. 197—203.
23. Сазыкина Т.А., Крышев И.И. Оценка контрольной концентрации радионуклидов в морской воде с учетом гигиенических и радиозологических критериев. — Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 4, с. 302—307.
24. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2000. 384 с.
25. Алексахин Р.М., Фесенко С.В. Радиационная защита окружающей среды. Радиационная биология. — Радиоз экология, 2004, т. 44, вып. 1, с. 93—103.

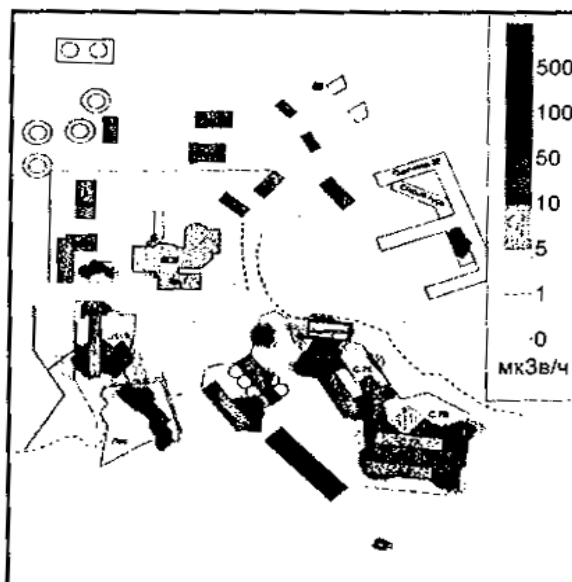
УДК 621.039.76+614.876

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРРИТОРИИ И АКВАТОРИИ В ГУБЕ АНДРЕЕВА

*Васильев А.П., Васюхно В.П., Нетеча М.Е. (НИКИЭТ),**Высоцкий В.Л., Калинин Р.И., Саркисов А.А. (ИБРАЭ),**Казеннов А.Ю., Сивинцев Ю.В., Черняев А.М. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Здания и сооружения пункта временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева (бывшая береговая техническая база Северного флота) были построены в конце 1950-х — начале 1960-х гг. Поскольку поступление отработавшего топлива заметно опережало вывоз, на нем скопилось большое количество топлива (~100 активных зон реакторов подводных лодок) и радиоактивных отходов. В течение более 40 лет эксплуатации здания и сооружения не ремонтировали, поэтому многие хранилища находятся в аварийном состоянии [1]. Из-за утраты их герметичности радиоактивные вещества поступают с грунтовыми водами на территорию. Талый снег и дождевые потоки постепенно расширяют зону загрязнения и выносят радионуклиды в морскую воду губы Андреева.

Определение радиозоологического состояния территории и акватории. Периодические обследования зданий, сооружений, территории и акватории в губе Андреева проводились силами службы радиационной безопасности флота, а также специалистами НИКИЭТа (наземная разведка) и РНЦ «Курчатовский институт» (акватория). В 2002—2004 гг. благодаря безвозмездной финансовой помощи Норвежского агентства по радиационной защите (Norwegian Radiation Protection Agency) были составлены картограммы радиационного загрязнения (рис. 1) и прове-



Р и с. 1. Распределение мощности эквивалентной дозы γ -излучения на территории пункта временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева

дено гидрогеологическое и радиационно-геологическое обследование большей части территории пункта хранения. Эти измерения количественно и качественно отличались от проведенных ранее: число измерений отобранных образцов грунта в десятки раз превысило то, что было сделано в предыдущие годы, обширные полевые исследования позволили построить картограммы γ -поля территории и акватории, выделить места расположения источников радиоактивного загрязнения и определить радионуклидный состав. На основе этих результатов была создана трехмерная база данных, содержащая информацию об источниках радиационного загрязнения территории, зданий и сооружений. С ее помощью можно оценивать реальные и потенциальные источники радиозкологической опасности и планировать работы по их устранению.

Здание 5 — бывшее хранилище отработавшего ядерного топлива. Первая очередь здания с двумя малыми бассейнами введена в строй в 1962 г. В 1973 г. сделана пристройка с двумя большими бассейнами. В 1982 г. зарегистрирована утечка воды из одного большого бассейна, которую не удалось остановить [2]. Затем потерял герметичность и второй бассейн. К этому времени часть топлива имела повреждения, некоторые чехлы с топливом из-за обрыва цепей упали на дно бассейнов. В результате с водой в грунт под зданием поступили ^{137}Cs и ^{90}Sr . Радиоактивными веществами пропитались стены здания и фундамент. На наружной поверхности стен мощность эквивалентной дозы достигала 10—20 мЗв/ч. Радионуклиды поступили в протекавший под зданием ручей, который выходил на поверхность в 20 м ниже от него на склоне холма и впадал в залив. В 1999 г. ручей был отведен от здания, но большая его часть осталась сильно загрязненной на глубину до 1 м. Даже в 2005 г. мощность дозы вдоль ручья соответствовала 100—200 мкЗв/ч, достигая в некоторых местах 450 мкЗв/ч, концентрация в грунте ^{137}Cs составляла $6 \cdot 10^6$ Бк/кг, ^{90}Sr — $4 \cdot 10^6$ Бк/кг.

В пробах бетона и кирпича из стен здания и фундамента удельная активность ^{137}Cs достигала $3 \cdot 10^8$ Бк/кг, ^{90}Sr — до 10^9 Бк/кг. Грунт вокруг здания также сильно загрязнен (до 10^9 Бк/кг). Эти радионуклиды, смываемые талыми и дождевыми водами, постепенно расширяют зону загрязнения и выходят на берег залива и акваторию.

Удельная активность донных отложений в районе впадения ручья в залив на расстоянии 20—30 м от берега составляет 200—300 Бк/кг. Содержание радионуклидов в морской воде не превышает 100 Бк/м³ [3], что существенно меньше природной активности морской воды, обусловленной ^{40}K ($\sim 10\,000$ Бк/м³).

После выгрузки отработавшего топлива из бассейнов на их дне остался слой ила, содержащий радиоактивные вещества. Излучение вблизи дна в среднем составляет 100 мЗв/ч, в отдельных точках достигает 200—600 мЗв/ч, что свидетельствует о наличии в иле фрагментов топлива. В 2005 г. сотрудники НИКИЭТа впервые сумели взять несколько проб ила. Его плотность $\sim 1,5$ г/см³, толщина слоя до 10 см, удельная активность ^{137}Cs $2,9 \cdot 10^8$ Бк/кг, ^{90}Sr $7,5 \cdot 10^8$ Бк/кг, ^{60}Co $2 \cdot 10^5$ Бк/кг, α -излучающих радионуклидов до $7,2 \cdot 10^4$ Бк/кг, т.е. ил представляет собой среднеактивные отходы. В технологическом зале на полу толстый слой пыли от бетонных плит, использовавшихся для защиты от излучения при выгрузке отработавшего топлива. Удельная активность пыли достигает $2,3 \cdot 10^9$ Бк/кг, в том числе α -излучающих радионуклидов $8,6 \cdot 10^5$ Бк/кг. Пыль и ил — потенциальные источники

загрязнения территории при разборке здания 5 или различных возможных аварийных ситуациях, что необходимо учитывать при выборе технологии снятия здания с эксплуатации.

Хранилища твердых и жидких отходов. Твердые отходы хранятся в семи хранилищах и на трех открытых площадках, часть из них находится в двух емкостях хранилища жидких отходов в здании 6. Для хранения жидких отходов используются четыре емкости здания 6. Емкости выполнены из бетона, облицованы коррозионно-стойкой сталью и заглублены на полную высоту. Срок их эксплуатации давно истек, три из них негерметичны, и жидкие отходы контактируют с грунтовыми водами. Также негерметичны и две емкости с твердыми отходами, они заполнены грунтовыми водами, которые превратились в жидкие радиоактивные отходы. Попытки их откачать закончились неудачей — хранилища вновь заполнились водой. Обследовать содержимое других заглубленных хранилищ пока не удалось, но по косвенным данным они тоже утратили герметичность. Точное количество, состав и состояние твердых отходов, находящихся в них, неизвестно.

Как показала инвентаризация, открытых площадок хранения твердых отходов намного больше, чем числилось при передаче пункта Минатому [4]. Радиационная картина пестрая. Часть твердых отходов, в том числе в контейнерах находится на крышах заглубленных хранилищ, в некоторых случаях невозможно определить, чем вызвана повышенная мощность эквивалентной дозы — излучением загрязненного грунта или источниками в контейнерах. Из-за плотной упаковки большого числа разнородных контейнеров к многим из них трудно добраться для проведения измерений. Так, возле сооружений 7 и 7А мощность дозы достигает 3000 мкЗв/ч, загрязнение грунта β -излучающими радионуклидами — $(4-6)10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$. По оценкам такая радиационная обстановка определяется излучением одного, может быть, двух контейнеров, стоящих на крыше хранилища 7А. Их необходимо убрать или экранировать, чтобы улучшить условия работы на площадке.

Возле стены здания 7А мощность дозы всего 150 мкЗв/ч, но поверхностное загрязнение грунта достигает $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$. Как показывает опыт работ, после удаления некоторых контейнеров или бетонных плит она может возрасти в несколько раз. Основные радионуклиды — ^{137}Cs и ^{90}Sr , но в некоторых местах имеется ^{60}Co (до 10%), α -излучающие радионуклиды не обнаружены.

Хранилище отработавшего топлива в блоках сухого хранения. При перегрузке отработавшего топлива из здания 5 в блоки сухого хранения предполагалось, что чехлы будут храниться в стальных трубах, пространство между которыми залито бетоном. При обследовании блока 2Б выяснилось, что все ячейки заполнены водой удельной активностью от 10^3 до 10^8 Бк/л. В 2004 г. сотрудники НИКИЭТа впервые взяли пробы воды из нескольких ячеек с разной глубины и обнаружили, что концентрация ^{137}Cs возрастает с глубиной в несколько раз, ^{90}Sr — в десятки и сотни раз. Надежно зарегистрировано и наличие в воде α -излучающих радионуклидов. Так, внизу ячейки 1147 удельная активность ^{137}Cs составляет $8,9 \cdot 10^7$ Бк/л, ^{90}Sr — $7,2 \cdot 10^8$ Бк/л, α -излучающих радионуклидов — $5,4 \cdot 10^4$ Бк/л. Это свидетельствует о контакте топлива с водой, вследствие чего в воду переходят не только продукты деления, но и актиноиды. Деградации топлива способствует высокое содержание (до 1500 мг/л), в том числе хлоридов (до 400 мг/л) [2]. Эти измерения проведены в зазоре между трубой ячейки и чехлом, в котором содержатся ТВС с

отработавшим топливом. До сих пор не удалось установить источник поступления воды в ячейки — контакт с грунтовыми водами или атмосферные осадки.

При радиационном обследовании блока 2Б выяснилось, что измеряемая над поверхностью ячеек мощность дозы в несколько раз превышает расчетную. Было показано, что «прострелы» γ -излучения между трубой и закрывающей ее пробкой или сквозь бетон вносят малый вклад (~ 1 мкЗв/ч), существенно больше доля радиоактивной воды в ячейке (100—500 мкЗв/ч) и загрязненного радионуклидами бетона между ячейками (100—200 мкЗв/ч). Основной вклад (до 2000—3000 мкЗв/ч) вносит ^{137}Cs на внутренней поверхности трубы ячейки и поверхности конструкций верхней части чехла. Из-за сезонных колебаний уровня воды коррозионная пленка, содержащая ^{137}Cs , может быть и над поверхностью воды в ячейке. Эти расчеты были подтверждены специально поставленными экспериментами.

Блок 3А по конструкции существенно отличается от 2А и 2Б. Над ним не было крыши, и над поверхностью бетона на высоте ~ 1 м соорудили укрытие из бетонных плит, закрыв их рубероидом. Отмечается высокий уровень излучения над поверхностью этих плит: в 1,5—2 раза больше, чем над трубами в блоке 2Б. Не было известно также, есть ли вода в ячейках. В декабре 2005 г. сотрудники НИКИЭТа провели радиационную разведку пространства под плитами укрытия. Были вскрыты зазоры между несколькими плитами (пробит слой рубероида с битумом), проведена видеосъемка с помощью эндоскопа и измерена мощность дозы в разных местах. В ячейках, не закрытых пробками, обнаружена вода, причем ее уровень сильно варьировал: от 20 до 100 см ниже верха трубы. Неизвестно, есть ли в этих ячейках чехлы с отработавшим топливом. Измеренная мощность дозы меняется в широких пределах, достигая над бетоном между двумя ячейками, закрытыми пробками, ~ 40 мЗв/ч. Причину столь высокого фона предстоит выяснить.

Территория вокруг блоков сухого хранения значительно менее загрязнена, чем на площадке твердых отходов или вокруг здания 5. Продолжающаяся деградация неизбежно приводит к распаду топлива на мелкие (20—200 мкм) гранулы. Как показали расчеты, образование гомогенной смеси этих частичек с водой может привести к самопроизвольной цепной реакции. Наиболее опасна концентрация 5—10% по объему топлива, что возможно, например, при осыпании его частичек в воду ячейки в процессе выгрузки чехла.

В случае самопроизвольной цепной реакции все содержимое чехла будет выброшено из ячейки, что приведет к сильному радиационному загрязнению не только блоков, но и окружающей территории. Поэтому при выборе технологии обращения с отработавшим топливом при его выгрузке из ячеек необходимо обеспечить детерминированное исключение самой возможности возникновения самопроизвольной цепной реакции. Это непростая задача, так как вода должна быть откачана не только из узкого (1—3 мм) зазора между чехлом и трубой ячейки, но и из самого чехла.

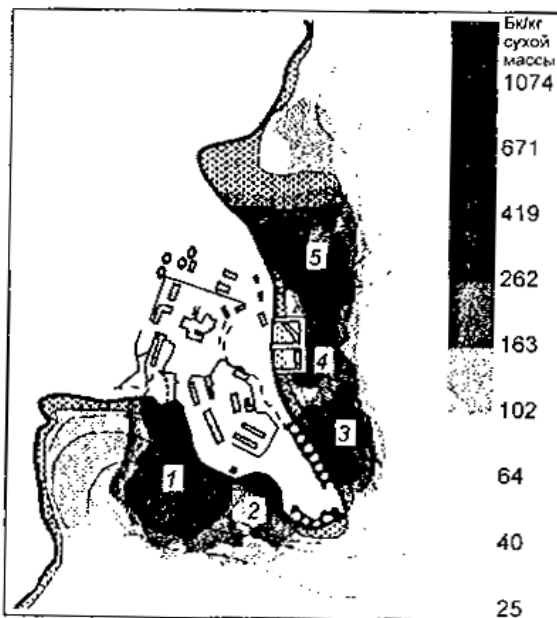
Акватория. Так как на период 1997 г. отсутствовала какая-либо достоверная информация о характере загрязнения прилегающей акватории, то основное внимание уделено получению общей картины загрязнения, для чего были проведены дополнительные обследования. Радиационную обстановку оценивали по результатам дозиметрических измерений и анализа радиоактивности прибрежного грунта, воды и донных отложений.

Измерения, проведенные с помощью погружного γ -спектрометра и фильтров-сорбентов, показали, что вода акватории не содержит γ -излучающие радионуклиды в количестве, превышающем фон ^{137}Cs — 5—7 Бк/м³. Дозиметрическая съемка была проведена в 56 точках вдоль береговой черты на высоте 1 м от поверхности почвы. Результаты измерения мощности дозы показали, что наиболее загрязненными являются территория вдоль русла ручья, стекающего от здания 5 (превышение над фоном в тысячи раз), низина между площадкой хранения твердых отходов и местом, где в 1997 г. находились плавучие емкости для жидких отходов, и район технического причала (превышение фона в десятки раз).

Полученные при дозиметрической съемке результаты были подтверждены анализом радиоактивности проб грунта, отобранных в этих местах. Всего за время проведения работ по периметру базы, в том числе и прибрежной полосе с шагом 40—50 м было отобрано 36 проб почвы и 28 проб донных отложений вдоль береговой черты на расстоянии 20—30 м от уреза воды. Следует отметить, что из-за каменистого характера грунта отбор проб в этой зоне был возможен только с помощью водолазов, причем из-за большой глубины пробы можно отбирать на расстоянии от берега только до 10 м. Отбор проб на большой глубине акватории губы Западная Лица не проводился. По результатам этого обследования построена картограмма загрязнения донных отложений ^{137}Cs в прибрежной полосе (рис. 2). Как видно, аномальные загрязнения техногенными радионуклидами выявлены на пяти участках:

на участке 1 прибрежной акватории вблизи места впадения в залив ручья, протекающего от здания 5. Это пятно обусловлено постоянным вымыванием радионуклидов из почвы, загрязненной в результате аварии в здании 5. По результатам радиационного обследования 1997 г. максимальная концентрация ^{137}Cs в донных отложениях вблизи места впадения ручья в залив достигала 500 Бк/кг;

в низине (участок 2) между площадкой хранения отработавшего топлива и твердых отходов — до $2 \cdot 10^4$ Бк/кг ^{137}Cs в почве береговой черты, а также на прилегающем к этой низине участке акватории, где в 1997 г. находилось 14 плавучих емкостей с жидкими отходами (до 500 Бк/кг ^{137}Cs и 30 Бк/кг ^{60}Co в донных отложениях). Это загрязнение, вероятнее всего, было вызвано миграцией радионуклидов с площадки хранения отработавшего топлива и твердых отходов, а также выходом радионуклидов из плавучих емкостей. Следует отметить, что проведенные к настоящему времени работы по разрезанию плавучих емкостей на месте могли привести к дополнительному загрязнению береговой черты и прилегающей акватории;



Р и с. 2. Содержание ^{137}Cs в донных отложениях прибрежной зоны пункта временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева по результатам обследования 1997 г.: 1—5 — участки радиоактивного загрязнения

под скалой (участок 3) с восточной стороны от площадки хранения отработавшего топлива и твердых отходов — до 850 Бк/кг ^{137}Cs и 70 Бк/кг ^{60}Co , что, вероятнее всего, обусловлено миграцией радионуклидов с площадки;

в районе причалов (участки 4, 5) на восточном берегу пункта хранения, что связано с перегрузкой и транспортировкой отработавшего топлива и радиоактивных отходов в ходе производственной деятельности. По результатам радиационного обследования 1997 г. максимальное содержание ^{137}Cs в почве береговой черты составляло 4 кБк/кг, в донных отложениях — 1 кБк/кг ^{137}Cs и 0,1 кБк/кг ^{60}Co .

По результатам обследования прибрежной акватории в 1997 г. можно сделать вывод, что основными источниками ее загрязнения являлись участки территории, включающие зону ручья и открытую площадку хранения отработавшего ядерного топлива и твердых отходов. Кроме того, существенное загрязнение акватории было вызвано многолетней производственной деятельностью, связанной с перегрузкой и транспортировкой отработавшего топлива и радиоактивных отходов.

В 1999 г. при проведении обследования основное внимание было уделено исследованию поступления радионуклидов в залив с водами ручья, стекающего от здания 5. По данным радиобиологической лаборатории ВМФ с момента обнаружения течи в этом здании (1982 г.) и до окончательной осушки бассейнов хранилища (1989 г.) ручей, впадающий в залив, имел следующие уровни загрязнения: на выходе на поверхность у здания 5 10^3 — 10^4 Бк/л, при впадении в залив — 1—2 Бк/л по ^{90}Sr и ^{137}Cs . Всего по данным ВМФ в результате течи хранилища в здании 5 в окружающую среду попало около 37 ТБк техногенных радионуклидов.

Обследование 1999 г. проводилось в весенний и летний периоды. Содержание ^{137}Cs в пробах воды из ручья ранней весной было наименьшим и изменялось от 25 до 300 Бк/л, в мае возрастало до 0,5 кБк/л, в сентябре достигало максимума — 1,3 кБк/л. Кроме того, не изучена возможная миграция радионуклидов по акватории губы Западной Лицы и далее в Мотовский залив Баренцева моря. Вместе с тем измерения, проведенные в 1996 г. Мурманским морским биологическим институтом, выявили в отобранных со дна внешней части залива Западной Лицы пробах донных отложений наличие ^{60}Co (0,5—4 Бк/кг), ^{137}Cs (0,7—50 Бк/кг) и $^{239, 240}\text{Pu}$ (до 2 Бк/кг) [5]. Такие уровни, в частности, для $^{239, 240}\text{Pu}$ соответствуют фону, однако значения, доходящие до 50 Бк/кг по ^{137}Cs , свидетельствуют о его повышенном содержании, не говоря о наличии ^{60}Co , который подтверждает техногенный характер источника загрязнения и миграцию последних двух радионуклидов в Мотовский залив.

Заключение. Радиэкологическое состояние территории пункта временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева в настоящее время определяется двумя реальными источниками ее загрязнения — зданием 5 и площадкой хранения твердых и жидких отходов. При утечке воды из бассейнов хранилища отработавшего топлива была загрязнена территория вокруг самого здания и под ним. Ручей, протекавший под зданием, выносил ^{137}Cs и ^{90}Sr на поверхность и загрязнил обширную территорию между зданием и берегом залива. Точное количество вынесенных радионуклидов и объем загрязненного

грунта неизвестны, так как радиационно-геологическое обследование с бурением скважин и измерением активности кернов проведено только на части загрязненной территории. Нет информации об активности радионуклидов, находящихся в почве под зданием. Поэтому желательно ускорить снятие с эксплуатации здания 5. Необходимо убрать со дна бассейнов ил, содержащий помимо продуктов деления фрагменты топлива общей активностью 70—150 ТБк. После демонтажа здания станет доступным обследование грунта под ним и удаление, что исключит возможность дополнительного загрязнения территории и попадания радионуклидов в море.

С открытой площадки хранения твердых отходов и негерметичных хранилищ твердых и жидких отходов радионуклиды продолжают поступать в почву, постепенно расширяя зону загрязнения. Количество загрязненного грунта оценить сейчас невозможно: не проведено обследование заглубленных хранилищ, неизвестно загрязнение грунта под контейнерами и бетонными плитами, вывезенными после ликвидации аварии из здания 5.

Радиационное обследование территории позволило выполнить ее зонирование. Приняты меры для снижения радиационного воздействия на персонал. Часть твердых отходов с открытых площадок фрагментирована и убрана в контейнеры в здание 67. Ликвидировано несколько локальных очагов загрязнения на территории пункта.

Обследование основного источника радиоз экологической опасности — блоков хранения отработавшего топлива, анализ возможных аварийных ситуаций и разработка оптимальных вариантов обращения с отработавшим топливом позволят избежать дополнительного опасного воздействия на окружающую среду. В результате территория губы Андреева будет приведена в экологически безопасное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантелеев В.Н. Общее описание объекта в губе Андреева. — В сб.: 13-е совещание Контактной экспертной группы МАГАТЭ. Оскарсхамн, Швеция, 6—8 ноября 2001, с. 37—42.
2. Аден В.Г. Техничко-экономические исследования по обращению с ОЯТ и реабилитации блоков сухого хранения. — В сб.: 14-е совещание Контактной экспертной группы МАГАТЭ. Вена, Австрия, 9—10 апреля 2002, с. 23—28.
3. Орлов Ю.В., Негеча М.Е., Шишкин В.А. и др. Радиационные обследования береговых технических баз Северо-Западного региона и проблема их реабилитации. — В сб.: Межд. конф. «Экологические проблемы утилизации АПЛ». Северодвинск, 2001, с. 148—150.
4. Васильев А.П. Техничко-экономические исследования по выбору экологически безопасных и экономически эффективных вариантов обращения с ТРО и ЖРО, накопленными на объектах в губе Андреева. — В сб.: Семинар Контактной экспертной группы МАГАТЭ по реабилитации губы Андреева. Москва, 20—21 марта 2002, с. 31—38.
5. Матишов Г.Г. и др. Радионуклиды и океанографические условия их накопления в Кольском и Мотовском заливах (Баренцево море): Препринт ММБИ КНЦ РАН. Мурманск, 1997. 43 с.