

УДК 621.039.7  
© 2006

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИЛОВ ВОДОЕМА КАРАЧАЙ – ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПО “МАЯК”

*Е.Г. Дрожко, П.М. Стукалов, А.И. Алексахин, И.А. Иванов, Н.А. Симкина  
Россия, г. Озерск, ФГУП “ПО “Маяк”*

Представлены результаты обследования техногенных илов водоема В-9 (Карачай) - хранилища радиоактивных отходов ФГУП “ПО “Маяк” (Росатом, г. Озерск Челябинской обл.), проведенного весной 2005 г. Илы содержат не менее половины всего запаса радионуклидов, накопленного в водоеме. Ветровой вынос радиоактивных аэрозолей с поверхности обнаженных илов обусловил аварию 1967 г. Техногенные илы слагают неоднородный слой донных отложений, вытесняемых скальным грунтом при производстве засыпки акватории, что предопределило применение специальной технологии для консервации водоема. В ходе работ 2005 г. получены данные о пространственном распределении техногенных илов на дне водоема, а также особенностях их физических свойств, химического и радионуклидного состава. По результатам обследования оценены объем илов – около 55 тыс. м<sup>3</sup> и суммарная активность бета-излучающих радионуклидов – 17 млн. Ки, которая определяется главным образом стронцием-90+иттрий-90 и цезием-137.

ПО “Маяк” – предприятие атомной индустрии России, производившее оружейный плутоний в годы “холодной” войны. Технологическая схема обращения с радиоактивными отходами была создана в 1950–60-х гг. и соответствовала существующим в то время в стране и мире представлениям о необходимом уровне радиационной безопасности. В соответствии с этой схемой сброс и хранение части жидких отходов производства осуществляется в изолированных от открытой гидрографической сети водоемах-хранилищах. Эксплуатация этих водоемов продолжается и в настоящее время. Наиболее загрязненным из них является оз. Карачай (водоем В-9). Потенциальный риск радиационной аварии, обусловленный существованием водоема Карачай, а также загрязнение воздушной среды и прилегающих к водоему площадей могут быть исключены только путем консервации самого водоема, реабилитации и обустройства прилегающей к нему территории. Начиная с 1986 г., ведутся планомерные работы по консервации В-9, сокращению и прекращению сбросов. Выполнение принятого Росатомом

“Комплексного плана по решению экологических проблем, связанных с деятельностью “ПО “Маяк” в части производства окончательного закрытия акватории водоема Карачай и превращения водоема в приповерхностный могильник радиоактивных отходов подразумевает реализацию третьей очереди проекта консервации водоема В-9 в современных условиях. Для обоснования основных технических решений проекта, а также обеспечения данных для модельных расчетов по перераспределению радионуклидов в компонентах водоема и их поступлению в горизонт подземных вод, в период 2002–2005 гг. проведены исследования по изучению современного состояния техногенных илов и суглинистых грунтов ложа водоема Карачай. В илах и суглинках ложа водоема аккумулирован основной объем сброшенной активности, которая в дальнейшем будет захоронена в могильнике на месте В-9. По данным обследования 2002 г. во всех компонентах открытой части водоема (вода, илы, суглинки ложа) находится около 30 млн. Ки бета-излучателей (стронций-90+иттрий-90, цезий-137) и 1 млн. Ки альфа-излучателей (изо-

топы плутония, америция, кюрия, урана) [1].

За период эксплуатации в водоеме В-9 был сформирован значительный слой техногенных илов. Техногенные иловые отложения (или, по используемому на “ПО “Маяк” термину, ПДО – подвижные донные отложения) водоема В-9 представляют собой преимущественно гидроксидные и гидрокарбонатные соединения металлов (алюминия, железа, в меньшей степени – марганца и других) с некоторой долей органического вещества и первичных илов озера-болота Карачай, а также песчаной фракции большей частью техногенной природы (перлитовые пульпы). По консистенции илы водоема В-9 подобны жидкой грязи, с переходом вверх по разрезу в придонный слой воды с большим количеством взвеси (1,5 г/л), вниз – в разуплотненные суглинки ложа (плотностью <math>1,9-2,0 \text{ г/см}^3</math>). Такие илы, попадающие в катего-

рию ВАО, слагающие возле оголовков старых линий сброса слой до 1/2 общей глубины водоема В-9, представляют существенную опасность при закрытии (засыпке) акватории вследствие высокой активности и способности выталкиваться материалом засыпки с выходом над поверхностью воды в случае недостаточности порового объема создаваемого массива. Возможные аварийные ситуации обусловлены вероятностью обнажения илов с последующим ветровым выносом радиоактивных аэрозолей с их поверхности.

В 2005 г. с целью опытного подтверждения технических решений проекта консервации водоема В-9 и информационного обеспечения его реализации выполнен большой комплекс полевых, лабораторных и расчетно-аналитических работ по изучению техногенных илов водоема Карачай и морфологии его дна.

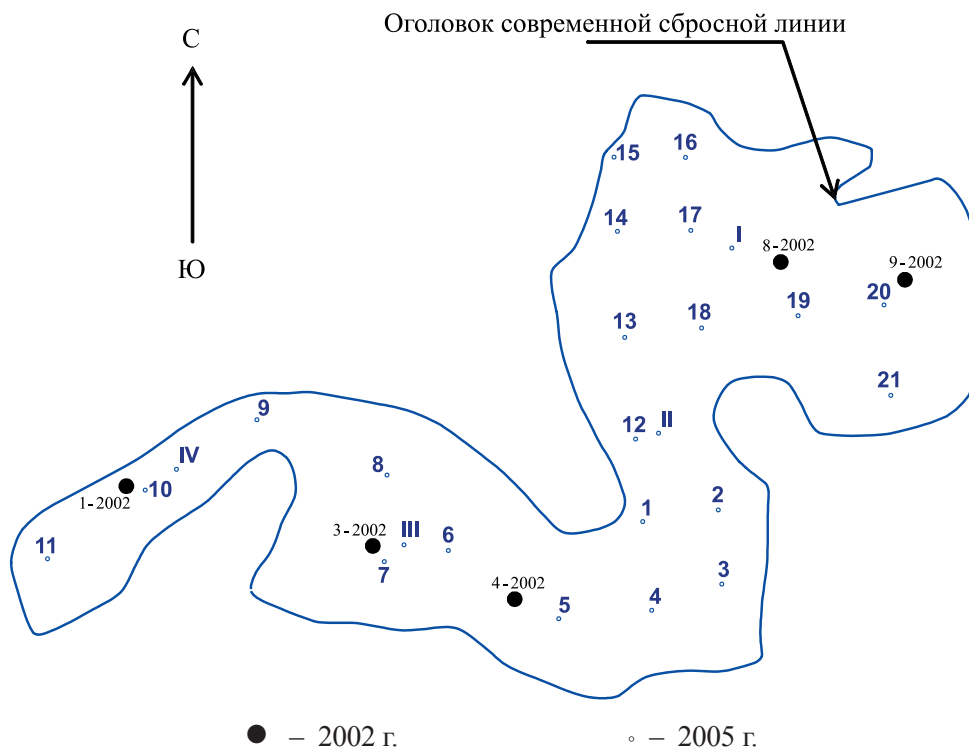


Рис. 1. Положение точек наблюдений 2005 г. в контуре водоема В-9 (Карачай) и их нумерация (в т.ч. с отбором проб: точки I–IV). Расположение точек наблюдений 2005 г. повторяет сеть соответствующих точек 1989 г. Показаны также положение и нумерация точек отбора проб 2002 г.

Полевые измерения 2005 г. проведены на основе методик, аналогичных использованным ранее в 1970 и 1989 гг. Измерение мощности техногенных илов выполнено с помощью авиа-левых штанг, погружаемых до упора в поверхность более плотных суглинков ложа водоема, а также 1,5-метровых отрезков киперных лент, закрепленных на нижних концах штанг. Мощность илов определялась по загрязнению киперных лент визуально, впоследствии – лабораторными радиометрическими измерениями гамма- и бета-активности 5-см отрезков этих же лент. Полевые измерения выполнялись по равномерной сетке ~50×50 м, продублировавшей измерения 1989 г., что позволило сопоставить полученные результаты. Сопоставление глубин водоема и мощности техногенных илов 2005 г. с аналогичными данными 1989 г. проведено на основе расчетов параметров водоема В-9 с использованием программ ГИС (табл. 1, рис. 2).

Результаты измерений на водоеме В-9 2005 г. свидетельствуют:

- о распределении техногенных илов в соответствии с первоначальным накоплением вблизи оголовков старых сбросных линий в северной части водоема и в соответствии с рельефом поверхности плотных грунтов дна (рис. 2, 3);
- о некотором перераспределении техногенных илов в сравнении с 1989 г. вследствие их перетекания в соответствии с рельефом дна и выдавливания в результате засыпки (рис. 2);
- о незначительном изменении рельефа

поверхности наиболее плотных грунтов дна водоема В-9 в сравнении с состоянием в 1989 г. (рис. 3).

Количественная оценка объема техногенных илов в современной акваторной части водоема – около 55 тыс. м<sup>3</sup> – превышает объем илов, приходящийся на этот же контур в 1989 г. приблизительно на 8 тыс. м<sup>3</sup>.

Для безаварийного закрытия последнего (по проекту работ) участка акватории – северо-восточного, возле оголовка сбросной линии, с мощностью илов не менее 1 м – потребуется создание массива с пористостью не менее 0,3, что вызовет необходимость использования полых бетонных блоков ПБ-1, применявшихся ранее для закрытия частей акватории с повышенной мощностью илов. Полученные данные о соотношении мощностей илов и глубин водоема подтверждают возможность безаварийного закрытия водоема Карачай с использованием имеющегося (и предусмотренного проектом консервации водоема В-9 третьей очереди) количества бетонных блоков – 2200 шт.

Опробование илов в 2005 г. (точки I–IV на рис. 1) выполнено с отбором проб верхней наиболее разжиженной части илового слоя, вещество которого не было охарактеризовано в ходе предыдущего обследования 2002 г., когда отбирались и изучались пробы более плотных илов и суглинков. В том и другом случае использовались различные пробоотборники, позволяющие решать поставленные задачи. Пробы 2005 г. – жидкие илы (взвеси) с водой

Таблица 1

Данные об основных параметрах водоема В-9 по состоянию на 1989 г. (зима) и 2005 г. (апрель)

Год	Методика расчета	Уровень воды, абс.отм.м	Площадь зеркала, тыс. м <sup>2</sup>	Объем водоема, тыс. м <sup>3</sup>	Средняя глубина, м	Объем* илов, тыс. м <sup>3</sup>	Средняя мощность илов, м
1989	палеточный способ по карте	250,72	292,8	605,6	2,07	139,3	0,476
	с применением программ MapInfo и SURFER		307,9	642,0	2,08	113,4	0,37
	с применением программы CREDO	252,19	102,4	355,6	3,47	45,6	0,48

Примечание. \* – оценки представляют консервативный вариант, т.к. выполнены с учетом общей мощности илового слоя, включая и плотные, и более жидкие (вытекающие из пробоотборника) иловые образования.

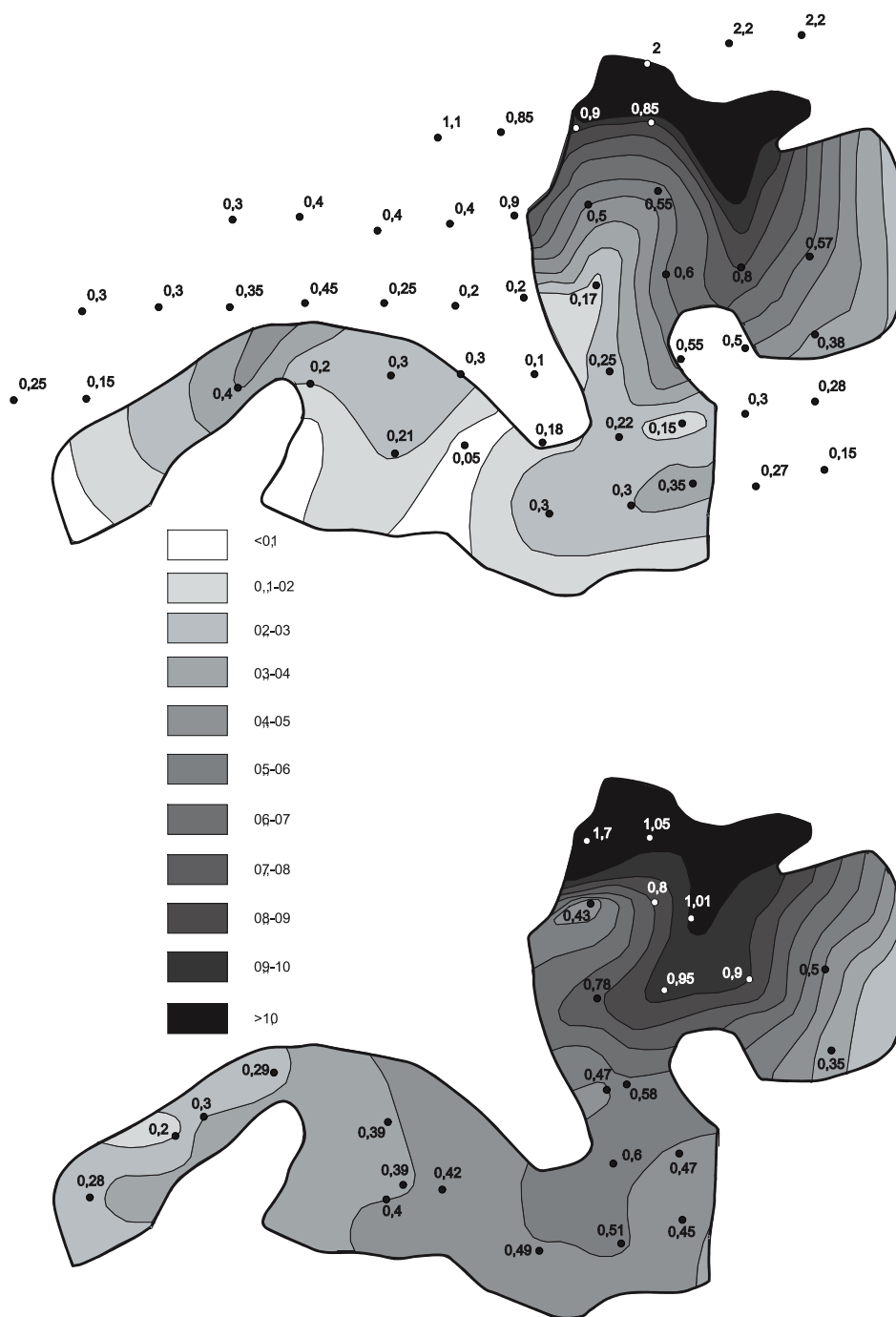


Рис. 2. Схема распределения техногенных илов по площади водоема по состоянию на 1989 г. (вверху) и 2005 г. (внизу) в контуре водоема на апрель 2005 г. Цифры возле точек наблюдений – измеренная общая мощность илов

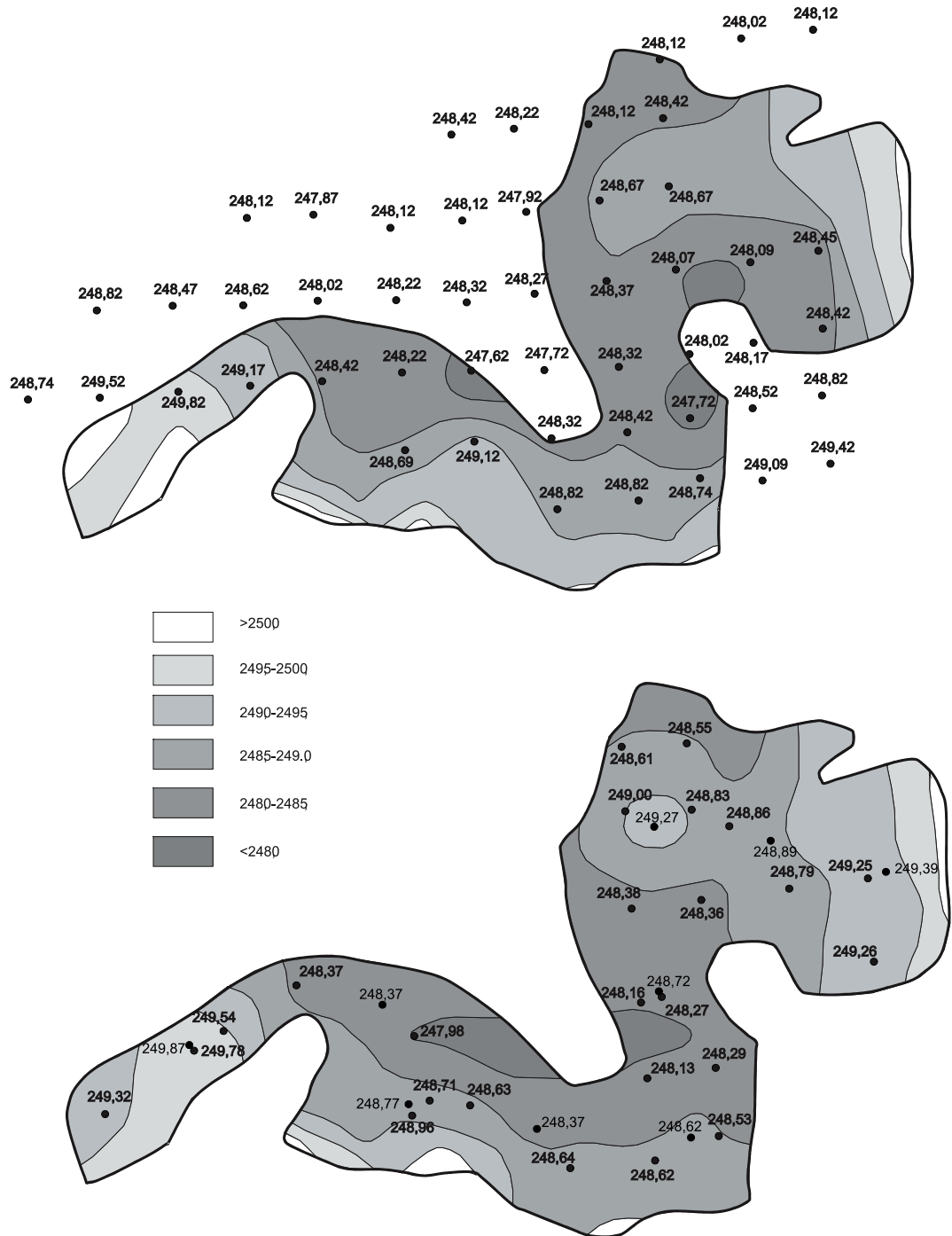


Рис. 3. Рельеф дна водоема В-9 по состоянию на 1989 г. (вверху) и 2002–2005 г. (внизу) в контуре водоема на апрель 2005 г. Числа возле точек наблюдений – абсолютные отметки дна

– были профильтрованы и исследованы отработанными лабораторными методами. Результаты определений основных катионов и радионуклидов представлены в табл. 2. Для сравнения приведены результаты опробования 2002 г. верхнего интервала (0–5 см) относительно плотных техногенных илов по ближайшим точкам наблюдений (рис.1): точки 8-2002, 3-2002 и 1-2002 – аналоги точек I, III и IV соответственно. По существу сопоставлены характеристики

обобщенного слоя жидких илов (взвесей) и пограничного с ним верхнего слоя более плотных илов. И те, и другие иловые образования характеризуются наибольшим среди компонентов водоема радионуклидным загрязнением, а также преобладанием тонкодисперсного вещества, что создает повышенную опасность ветрового разноса при обнажении илов (подобно аварии 1967 г.) или их подъеме над поверхностью воды при засыпке акватории.

Таблица 2

Содержание катионов, удельные активности бета-излучающих и альфа-излучающих радионуклидов в пробах техногенных илов опробования 2005 г., соответственно, в г/кг сух. массы и Бк/кг сух. массы при 100 °С

№ точки пробоотбора / Катионы и радионуклиды	I-2005	8-2002	II-2005	III-2005	3-2002	IV-2005	1-2002
Кальций	27,41	24	116,5	54,54	59	81,36	46
Магний	31,33	13	49,06	9,54	30	56,95	38
Натрий	10,77	25	10,43	6,82	50	8,14	25
Калий	1,96	–	1,47	2,73	–	1,63	–
Алюминий	23,50	29	85,85	34,09	89	21,15	38
Железо	137,1	23	79,72	49,09	36	48,82	23
Марганец	14,10	3	24,53	13,64	4	8,14	1
Хром	1,96	2,7	1,84	3,27	11,8	1,63	1,3
Уран	6,27	1,8	4,415	3,27	5,7	1,06	0,71
Титан	0,39	–	0,25	0,55	–	0,81	–
Цезий-137	3,24E+10	1,7E+10	3,87E+10	9,23E+10	1,1E+10	2,04E+10	1,5E+10
Цезий-134	5,52E+08	8,0E+07	8,46E+08	6,33E+08	–	3,20E+08	3,6E+07
Америций-241	5,68E+08	7,0E+08	1,84E+08	–	–	3,62E+08	–
Европий-155	2,29E+09	1,6E+08	1,41E+09	–	–	8,14E+06	–
Европий-154	9,23E+09	1,3E+08	4,00E+09	6,55E+08	–	3,91E+08	–
Кобальт-60	–	–	4,94E+07	–	–	1,03E+07	–
Церий-144	5,87E+09	–	1,99E+09	–	–	–	–
Сурьма-125	1,15E+09	–	1,01E+09	5,35E+07	–	4,87E+07	–
Рутений-106	1,97E+08	–	1,20E+09	–	–	9,41E+07	–
Стронций-90 +иттрий-90	2,8E+11	2,1E+10	1,87E+11	2,0E+11	3,0E+10	6,5E+10	7,4E+09
Сумма бета-излучателей	3,33E+11	3,9E+10	2,37E+11	2,95E+11	4,1E+10	8,68E+10	2,3E+10
Плутоний-239, 240	7,08E+08	6,4E+07	2,66E+08	8,26E+07	3,0E+07	8,13E+07	1,04E+07
Америций-241+плутоний-238	1,21E+10	4,9E+08	5,33E+09	1,13E+09	4,9E+07	6,44E+08	2,7E+07
Кюрий-244	7,11E+09	1,3E+08	3,37E+09	4,19E+08	1,3E+07	2,08E+08	4,2E+06
Сумма альфа-излучателей	2,08E+10	7,1E+08	8,96E+09	1,63E+09	1,1E+08	1,04E+09	4,4E+07

Примечание. “–” – ниже предела определения.

Отметим, что по данным опробования 2002, 2005 гг. (табл. 2) сухое вещество жидких илов (взвесей) характеризуется значимо более высокими концентрациями отдельных металлов и основных радионуклидов по сравнению с плотными илами, превосходя по значениям в несколько раз: Fe – в 1,5–23; Mn – в 3–8; Cs-137 – в 1,5–8; Cs-134 – в 7–8; Sr-90+Y-90 – в 6–13; сумме альфа-излучателей – 15–29. В то же время вещество плотных илов имеет большие концентрации Na (в 2,5–7 раз) и Al (в 1,2–3 раза).

В лабораторных условиях были выполнены радиометрические поинтервальные 5-см промеры 1,5-метровых киперных лент, которые в ходе полевых измерений 2005 г. погружались на всю мощность илового слоя до поверхности плотного суглинистого ложа. Как показали результаты измерений, отрезки лент, погружавшиеся в слой илов, характеризуются значениями МЭД и ППБЧ на 2–3 порядка большими, чем отрезки, погружавшиеся только в воду водоема. Пример типичного изменения с глу-

биной МЭД и ППБЧ от отрезков лент приведен на рис. 4. Полученные результаты показывают наличие хорошо выраженной границы “вода-илы” с отчетливым переходом в пределах 5-ти см, реже 10–15-ти см, от воды к илам, которые представляют собой компонент водоема с наиболее высокой удельной активностью. Данные о положении границы “вода-илы”, полученные радиометрическими измерениями и полевыми визуальными определениями по следу илов на киперной ленте, достаточно хорошо совпадают между собой. Это позволяет говорить об определенной достоверности результатов полевых измерений и карт распределения илов, полученных на их основе (рис. 2).

Данные, полученные в ходе работ 2005 г., подтвердили наличие в водоеме В-9 техногенных илов существенно разной консистенции, различающихся своими физико-механическими свойствами. Верхний слой жидких (текучих) иловых отложений мощностью 5–75 см (в среднем 30 см) можно охарактеризовать как

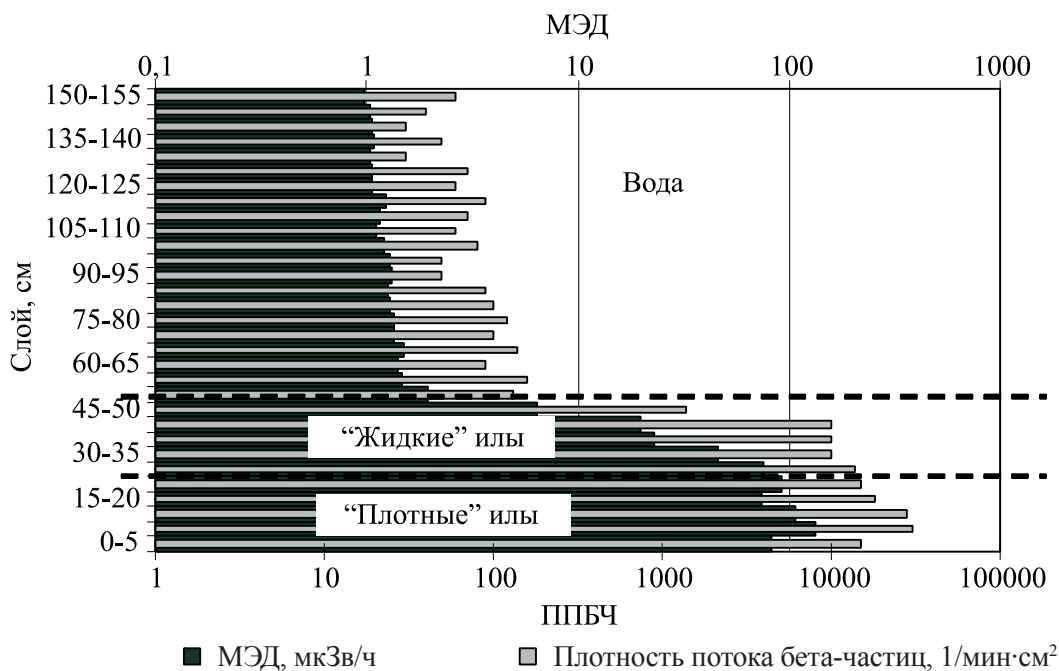


Рис. 4. Распределение МЭД и ППБЧ по длине киперной ленты, которая была погружена на всю мощность слоя илов (точка 4 на рис. 1). Отчетливо видна граница “вода-илы” по резкому – на порядки – нарастанию показателей МЭД и ППБЧ



разжиженные илы: “илы, взвешенные в воде” и “взвеси”. Нижний слой более плотных илов мощностью 5–125 см (в среднем 25 см) представляет собой малоподвижные илы, слабо перемешивающиеся в естественных условиях. В этом слое вода находится преимущественно в виде поровой. Вещество слоя плотных илов не вытекает из пробоотборника вместе с придонной водой; илы проявляют текучесть только при определенном усилии, например, при засыпке. Слои и тех, и других илов аккумулируют значительную часть радионуклидов водоема, а также оставляют на погружаемой в них киперной ленте след, хорошо выделяющийся как по визуальным наблюдениям, так и по радиометрическим измерениям. Вместе с тем, как уже указывалось выше, в 2005 г. были отобраны пробы только жидких илов (при сопровождающем промере мощности всего илового слоя и получении бета- и гамма-характеристик по вертикальному сечению слоя в 25 точках). Плотные илы и суглинки ложа были изучены в 2002 г. Сопоставление данных опробования и измерений общей мощности илового слоя 2005 г. показало возможность достаточно достоверного разделения жидких и плотных илов по интенсивности окраски следа илов на киперной ленте с точностью около  $\pm 4,0$  см, поскольку в точках отбора проб расхождение по длине интервалов интенсивного загрязнения лент и колонок плотных илов составило от 1 до 7 см. Запасы радионуклидов в техногенных илах водоема были рассчитаны суммарно и отдельно по слоям после разбивки слоя илов водоема на жидкие и плотные по данным визуальных наблюдений.

Радиометрические параметры – изменение МЭД и ППБЧ следа илов по длине киперной ленты – представляют собой характеристики изменения концентраций основных радионуклидов в полном разрезе илов (включая как жидкие илы (взвеси), так и слой более плотных илов). Такие характеристики были получены для всех 25 точек обследования водоема 2005 г. и позволили произвести оценку суммарных запасов радионуклидов, депонированных в илах. В основе расчетов при выполнении указанной оценки была использована зависимость радиометрических показателей и значений объемной активности проб илов с соответствующих ин-

тервалов. На рис. 5 приведены графики таких зависимостей и уравнения линейной регрессии, связывающие значения МЭД, ППБЧ загрязненных киперных лент и объемной активности бета- и гамма-излучающих радионуклидов в илах, полученные по данным опробования и измерений по 4 точкам наблюдения 2005 г. (получено соотношение показателей объемной гамма- и бета-активности каждой пробы жидких илов (взвесей) и соответствующей интервалу пробы суммы показателей МЭД и ППБЧ отрезков ленты). Как видно по рис. 5, рассматриваемые зависимости достаточно корректны для 4-х равномерно разнесенных по площади точек опробования (точки I–IV на рис. 1), что позволило применить найденные соотношения для расчетов объемной активности илов по всем точкам наблюдения 2005 г.

При использованном подходе к оценке суммарного запаса радионуклидов в илах водоема В-9 приняты следующие допущения:

- твердое вещество по всему иловому слою характеризуется приблизительно одинаковым соотношением загрязняющих радионуклидов (это принципиально для соотношений бета-излучателей);

- изменение загрязнения по длине киперной ленты для каждой точки наблюдения достаточно точно пропорционально изменению объемной активности в вертикальном разрезе илового слоя в этой точке.

Для принципиального подтверждения возможности применения ко всему слою илов зависимостей, полученных на параметрах жидких илов (взвесей), было проведено сопоставление результатов обследований 2005 и 2002 гг. с рассмотрением данных по сближенным точкам опробования (рис. 1). Напомним, что в 2002 г. были исследованы пробы плотных илов и суглинков ложа водоема. Полученные в 2005 г. удельные активности нижней части илового слоя (более плотных илов) для близких точек наблюдения 2002 г. дают удовлетворительную сходимость зависимости удельной активности от МЭД и ППБЧ (рис. 6). Несколько иной характер соотношения (коэффициент зависимости объемной активности от МЭД меньше  $\sim$  в 1,5, а от ППБЧ больше  $\sim$  в 1,3) может быть обусловлен: 1) недостаточной корректностью данного соотношения, определенного по параметрам сбли-



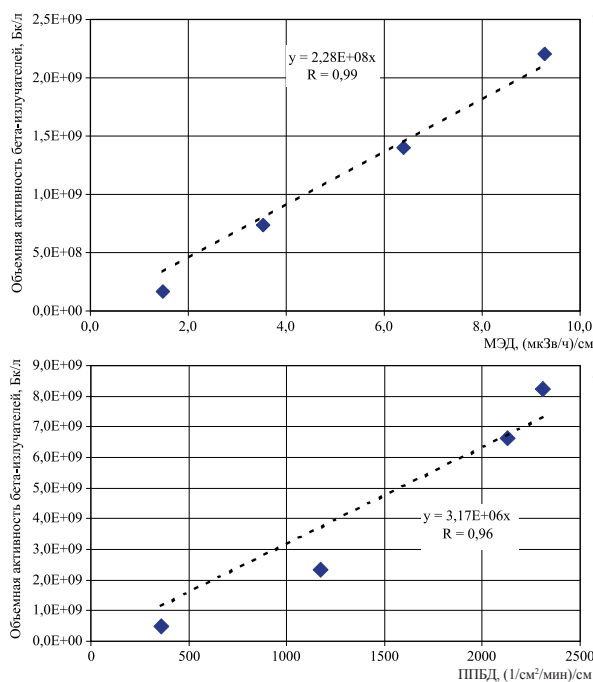


Рис. 5. Графики линейной зависимости между объемной активностью гамма- (вверху) и бета-излучателей (внизу) проб илов и соответствующих им значений МЭД (вверху) и ППБЧ (внизу) киперной лент, R – коэффициент корреляции

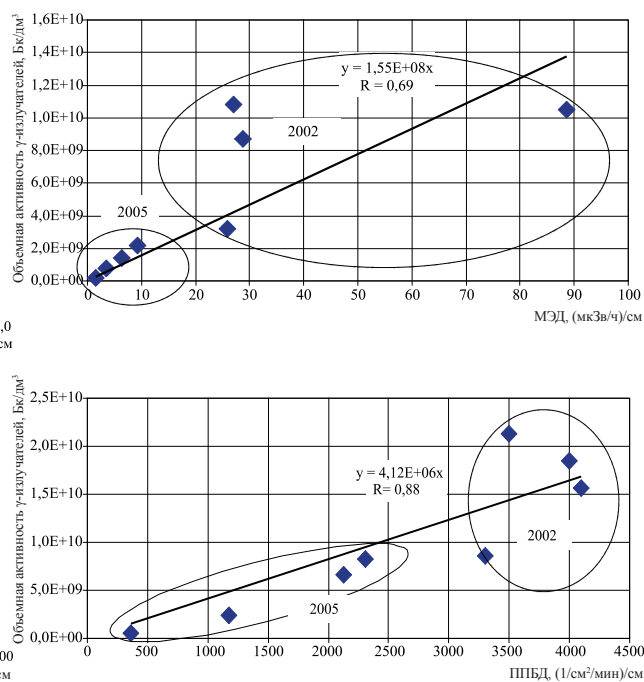


Рис. 6. Зависимость между объемной активностью гамма- (вверху) и бета-излучателей (внизу) техногенных илов и соответствующими им МЭД (вверху) и ППБЧ (внизу) киперной ленты по результатам опробования 2002 и 2005 гг., R – коэффициент корреляции

женных, но все же разных точек опробования и наблюдения; 2) следствием погрешностей, которые обусловлены допущениями, указанными в предыдущем абзаце. Тем не менее, полученные зависимости (рис. 6) показывают принципиальную возможность применения метода радиометрического измерения загрязненных киперных лент для оценки объемной активности техногенных илов. Для количественных оценок суммарной активности были использованы указанные выше зависимости – рис. 5 (с учетом большей корректности такого подхода и представительности опробования).

Полученные соотношения значений МЭД, ППБЧ загрязненных киперных лент и объемной активности бета- и гамма-излучающих радионуклидов соответствующих колонок илов позволили на основе данных о загрязнении

киперных лент в 25 точках водоема рассчитать значения суммарной активности слоя техногенных илов, а также получить представление о распределении бета- и гамма-излучающих радионуклидов в слое илов по площади водоема (рис. 7). Основные закономерности такого распределения, как это видно из рис. 7, определяются двумя факторами: 1) распределением мощностей илов (см. рис. 2 и рис. 7) и 2) наличием эффекта “струйности”, или распределения по струе – линейно вдоль осевой линии водоема с уменьшением активности при удалении от оголовка линии сброса. Последнее может быть, например, следствием проявления течения преимущественно в придонном слое воды от оголовка сброса к наиболее фильтрующему участку водоема в его юго-западной части.

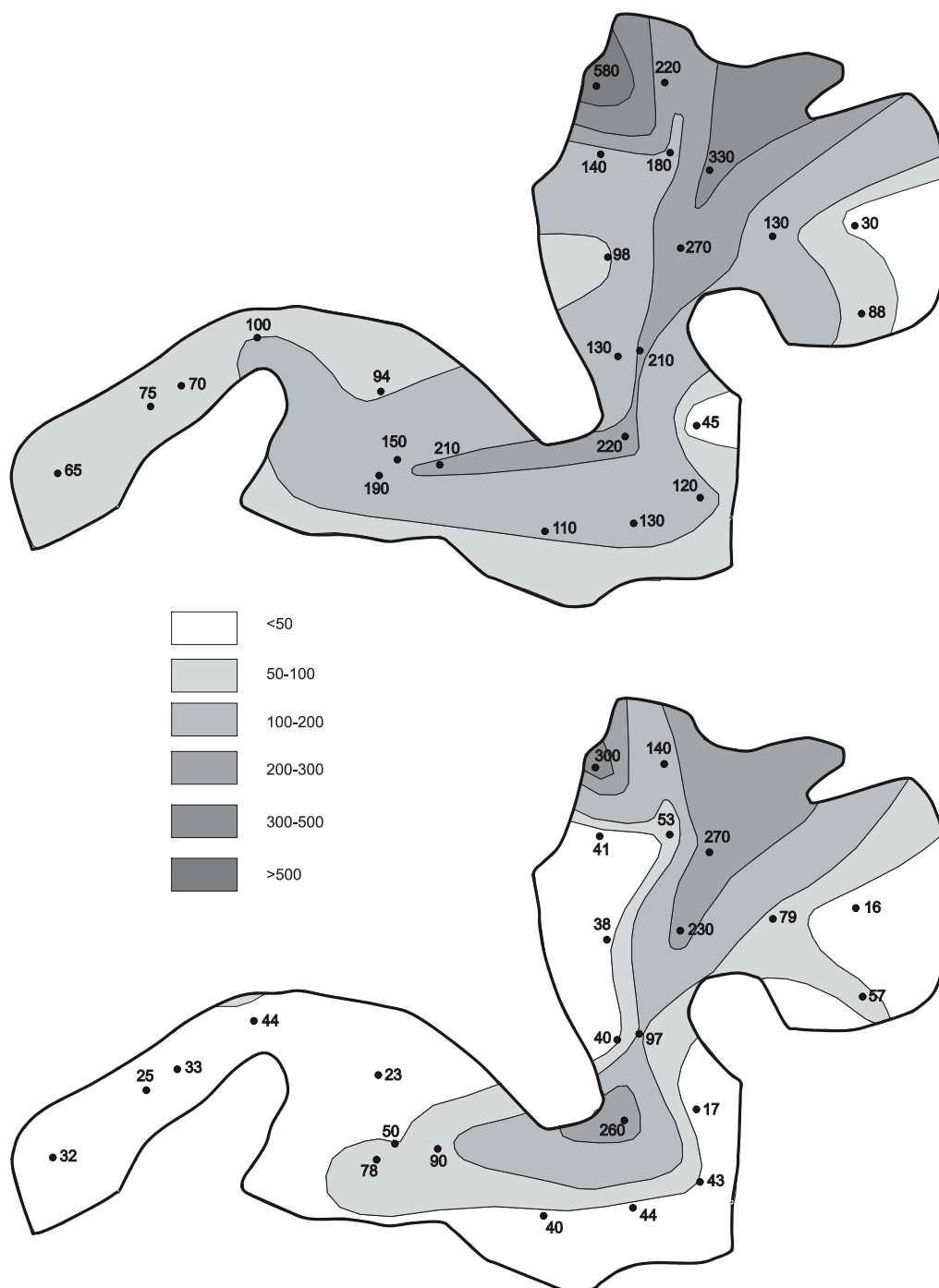


Рис. 7. Распределение бета- (вверху) и гамма-излучающих (внизу) радионуклидов в слое техногенных илов водоема Карачай (В-9) по результатам обследования 2005 г.,  $\text{Ки}/\text{м}^2$

*В результате были получены следующие оценки суммарной активности техногенных илов водоема В-9 (Карачай) по состоянию на март 2005 г.:*

- по гамма-излучающим радионуклидам (активность определяется, главным образом, цезием-137) – 8,5 млн. Ки (с распределением: жидкие илы (взвеси) – 2,1 млн. Ки; плотные илы – 6,4 млн. Ки);

- по бета-излучающим радионуклидам (активность определяется, главным образом, цезием-137 и стронцием-90+иттрий-90) – 17 млн. Ки (с распределением: жидкие илы (взвеси) – 6 млн. Ки; плотные илы – 11 млн. Ки).

Таким образом, в результате полевых и лабораторных работ по изучению техногенных илов водоема В-9 (Карачай), выполненных в 2005 г., получены экспериментальные данные о распределении илов по площади акватории водоема, физических параметрах илов, основных особенностях их химического и радионуклидного состава. На основе полученных результатов были уточнены современные морфометрические параметры водоема и получены оценки суммарной активности основных радио-

нуклидов, депонированных в слое техногенных илов. Новые данные о морфометрических параметрах водоема В-9 и пространственном распределении техногенных илов подтвердили состоятельность принятых проектных решений по консервации водоема.

В дальнейшем, с использованием проб илов, отобранных в 2005 г., был выполнен комплекс экспериментальных работ по изучению десорбции радионуклидов из донных отложений водоема (основные результаты работ предполагается изложить в отдельной статье). Результаты выполненных исследований послужат основой прогнозных оценок поступления радионуклидов из грунтов дна водоема Карачай в подземный водоносный горизонт с фильтрационным потоком после консервации водоема.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дрожко Е.Г., Стукалов П.М., Иванов И.А., Алексахин А.И. Результаты комплексного обследования водоема Карачай в 2002 году // Вопросы радиационной безопасности. – 2004. – № 1. – С. 33–43.