

7.5. Оценка скорости седиментации и осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных (Чернобыльских) радионуклидов*

Н.Ю. Мирзоева, С.Б. Гулин, И.Г. Сидоров, Л.В. Гулина

Известно [Егоров, 2001], что биогеохимический цикл, берущий начало с поступлением радиоактивных веществ в водную среду, завершается их седиментационным поступлением в геологические депо в составе донных отложений. Особенностью аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), произошедшей 26 апреля 1986 г., было то, что радиоактивное загрязнение окружающей среды произошло на масштабе времени значительно меньшем, чем характерное время протекания биогеохимических процессов. Поэтому послеаварийные радионуклиды, попавшие в морскую среду, в качестве радиотрассеров могут характеризовать интенсивность гидрологических и биогеохимических процессов, происходящих в экосистемах Черного моря.

*Работа выполнена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем», № АААА-А18-118020890090-2.

После аварии на Чернобыльской АЭС для определения возраста донных отложений и оценки скорости осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря наибольшее распространение получили радиоизотопные методы с использованием совместно природных и искусственных (^{137}Cs) радионуклидов [Гулин и др., 1995, 1997, 2000, 2008; Koide et al., 1972; Gulin et al., 2002]. В дальнейшем геохронологический метод датировок донных осадков Черного моря по профилям концентрации ^{137}Cs [Гулин и др., 1995, 1997] был дополнен датировками по ^{90}Sr [Мирзоева и др., 2005; Мирзоева, 2008; Поликарпов и др., 2008a]. В Черном море такое совместное использование природных и искусственных радионуклидов для датировки донных отложений было осуществлено ранее только в абиссальной части [Moore, O'Neill, 1991; Buesseler, Benitez, 1994], где преобладает биогенный тип седиментации [Ross et al., 1970].

Цель работы состояла в определении возраста донных отложений с использованием искусственных (^{137}Cs , ^{90}Sr) и природных (^{40}K , ^{210}Pb , ^{226}Ra) радионуклидов в качестве радиотрассеров, расчете скорости седиментации взвешенного вещества и осадконакопления в прибрежных зонах, на континентальном шельфе и в глубоководном бассейне Черного моря, включая районы струйных газовыделений из дна во всем диапазоне глубин моря.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определить распределение восстановленной на дату отбора проб концентрации искусственных и природных радионуклидов по слоям в колонках донных отложений; рассчитать кумулятивную массу ($\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$) слоев донных отложений в отобранных колонках за вычетом солей и поровой воды; выявить «бомбовый» и «аварийный» пик концентрации искусственных радионуклидов в профиле отобранных колонок донных отложений; оценить хронологию поступления радионуклида в донные осадки исследуемых районов; определить скорость седиментации, рассчитать скорость осадконакопления в исследуемых районах Черного моря.

Пробы донных отложений в различных районах Черного моря отбирали во время 38, 42, 45, 48, 49, 51, 52 54 и 55-го научных рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (1992–2000 гг.), 33 рейса НИС «Maria S. Marian», Германия (02.11.2013–06.12.2013 г.). Колонки донных отложений из районов активных газовыделений из дна Черного моря были отобраны в 60 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (24 мая – 25 июня 2004 г.) (рис. 7.5.1) в рейсе на НИС «Meteor», Германия (26 февраля–02 апреля 2011 г.). Экспедиции выполнялись по международным программам Европейской Комиссии (проекты EROS-2000, EROS-21, BIGBLACK, INTAS-RFBR-95-1067), Международного Агентства по Атомной Энергии (проект RER/2/003) и фонда Фольксваген (Германия).

Отбор проб донных отложений проводили с помощью трубчатого мультикорера Bowers & Connelly Mark-II-400 (Великобритания) (см. рис. 7.5.1), а также мультикорером фирмы Hydrobios (Германия). Мультикорер позволял получать одновременно 4 колонки мягких осадков диаметром 9 см с максимальной сохран-

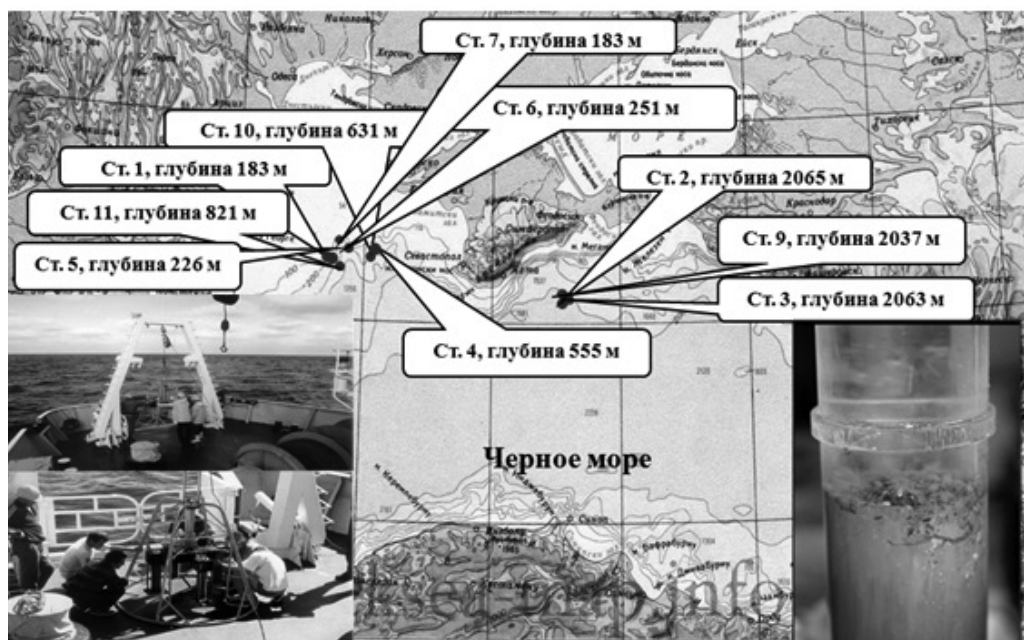


Рис. 7.5.1. Схема расположения станций отбора проб донных отложений в районах газовыделений из дна в бассейне Чёрного моря, отбор седиментов с помощью трубчатого мультикорера Bowers & Connelly Mark-II-400, колонка донных отложений (рейс НИС «Профессор Водяницкий» № 60, 2004 г.).

ностью слоев. Полученные колонки (см. рис. 7.5.1) нарезали на слои толщиной от 0,2 до 2 см с помощью винтового экструдера, описанного, например, в работе [Рарисси, 1997], прямо на корабле непосредственно после отбора.

В качестве резака использовали алюминиевую фольгу толщиной около 100 мкм. Для уменьшения пристеночного эффекта 0,5-сантиметровый край каждого сегмента донных отложений отрезали с помощью заостренного кольца меньшего диаметра. Сразу после нарезки пробы взвешивали, сушили при температуре 40–50°C и затем вновь взвешивали, определяя количество выпаренной воды. Для оценки исходной влажности донных отложений рассчитывали содержание солей, растворенных в поровой воде [Schafer et al., 1980]. Пробы донных отложений в Севастопольских бухтах отбирались с маломерного судна с использованием акриловой грунтовой трубки (внутренний диаметр – 58 мм) с вакуумным затвором. Колонки были отобраны в 1998, 2009 и 2016 гг. в рамках радиоэкологического мониторинга, проводимого ОРХБ ИМБИ (1986-2018 гг.).

Средняя скорость осадконакопления рассчитывалась по формуле:

$$S = h / (T - T_0), \quad (7.5.1)$$

где S – скорость осадконакопления ($\text{см} \cdot \text{год}^{-1}$); T – абсолютный возраст слоя (годы); T_0 – год отбора пробы; h – средняя глубина слоя (см).

Содержание радионуклидов ^{40}K , ^{210}Pb , ^{226}Ra и ^{137}Cs в высушенных пробах определяли с использованием полупроводникового детектора ORTEC GMX-10 (США), выполненного на основе кристалла сверхчистого германия. Калибровку детектора осуществляли с помощью стандартных образцов донных отложений IAEA-306 и IAEA-315, поставляемых МАГАТЭ [IAEA, 1998] и имевших форму и размеры, аналогичные исследованным нами образцам донных отложений. Во всех случаях величина относительной погрешности не превышала 10%. Измерение активности ^{90}Sr производили по черенковскому излучению его дочернего продукта ^{90}Y с использованием низкофонового жидкостного сцинтилляционного счетчика (LSC) ЛКВ «Quantulus 1220». Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20%. Относительное содержание органического вещества в донных отложениях определяли по изменению веса пробы после ее озоления в муфельной печи при температуре 450°C .

Подробное описание методов измерения активности радионуклидов в пробах колонок донных отложений Черного моря представлено в монографии [Поликарпов и др., 2008а].

Пример использования природных радионуклидов (^{210}Pb , ^{226}Ra) в качестве радиотрассеров для расчета скорости седиментации представлен на рис. 7.5.2.

На рис. 7.5.2 представлены данные о вертикальном распределении ^{210}Pb в донных отложениях у дельты Дуная [Гулин и др., 1997], которые соответствуют активности т.н. «избыточного» ^{210}Pb относительно содержания его материнского радионуклида – ^{226}Ra , имеющего значительно больший период радиоактивного распада ($T_{0.5} = 1600$ лет) и меньшую способность сорбироваться взвешенным веществом. Величину избыточного ^{210}Pb определяют путем вычитания удельной радиоактивности ^{226}Ra из исходного содержания ^{210}Pb в соответствующем слое осадка [Krishnaswami et al., 1971; Appleby, Oldfield, 1978]. Полученное значение отражает седиментационное поступление ^{210}Pb из водной тощи, дополнительно к его содержанию в донных отложениях, образованному за счет радиоактивного распада ^{226}Ra [Megumi, 1978; Robbins, 1978]. В идеальном случае, когда скорость осадконакопления постоянна, а перемешивание донных отложений незначительно, содержание избыточного ^{210}Pb должно экспоненциально убывать вглубь осадка вплоть до горизонтов, где оно становится равным активности ^{226}Ra , отражая т.н. «вековое» равновесие этих двух радионуклидов [Appleby, 1998]. При таких условиях параметры аппроксимирующей экспоненты служат основанием для расчета скорости седиментации донных отложений согласно уравнению [Anderson et al., 1987; Buesseler, Benitez, 1994]:

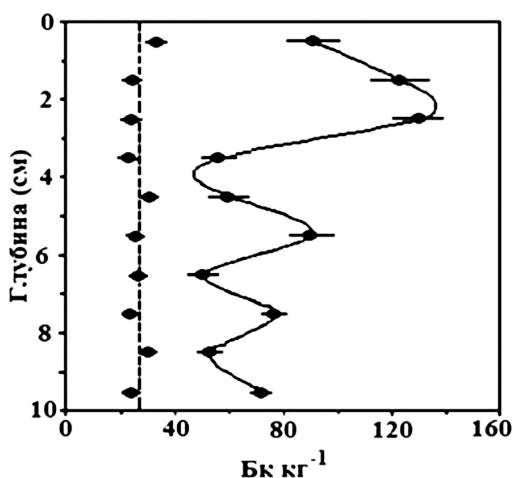


Рис. 7.5.2. Вертикальные распределения ^{210}Pb (●) и ^{226}Ra (◆) в донных отложениях Черного моря у дельты Дуная в июне 1994 г. [Гулин и др., 1997; Gulin et al., 1997].

$$A(z) = A_0 \exp(-\lambda z / S), \tag{7.5.2}$$

где $A(z)$ – концентрация избыточного ^{210}Pb (Бк·кг⁻¹) в слое z (см или г·см⁻²); A_0 – концентрация ^{210}Pb в поверхностном слое осадка (Бк·кг⁻¹); λ – постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb (0,0311 год⁻¹); S – скорость осадконакопления (см·год⁻¹, или г·см²·год⁻¹).

Распределением радионуклида в колонках донных отложений, отобранных в районе Днепровско-Бугского лимана и в приустьевой зоне реки Чорох (рис. 7.5.3, 7.5.4), показан метод датировки донных отложений Черного моря с использованием искусственных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в качестве радиоактивных трассеров [Гулин и др., 1997; Мирзоева и др., 2005; Мирзоева, 2008; Поликарпов и др., 2008a].

Возраст донных осадков определялся по формуле [Гулин и др., 1997; Gulin et al., 1997; Поликарпов и др., 2008]:

$$\text{Возраст слоя} = D - \frac{G}{V}, \tag{7.5.3}$$

где возраст слоя – средняя дата отложения данного осадочного слоя; D – дата отбора пробы осадка; G – средняя глубина слоя донных отложений (см); V – средняя скорость осадконакопления (см·год⁻¹).

Сравнение полученных результатов по концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr выявило их практически сходный характер по распределению в колонках донных отложений Черного моря (см. рис. 7.5.3, 7.5.4).

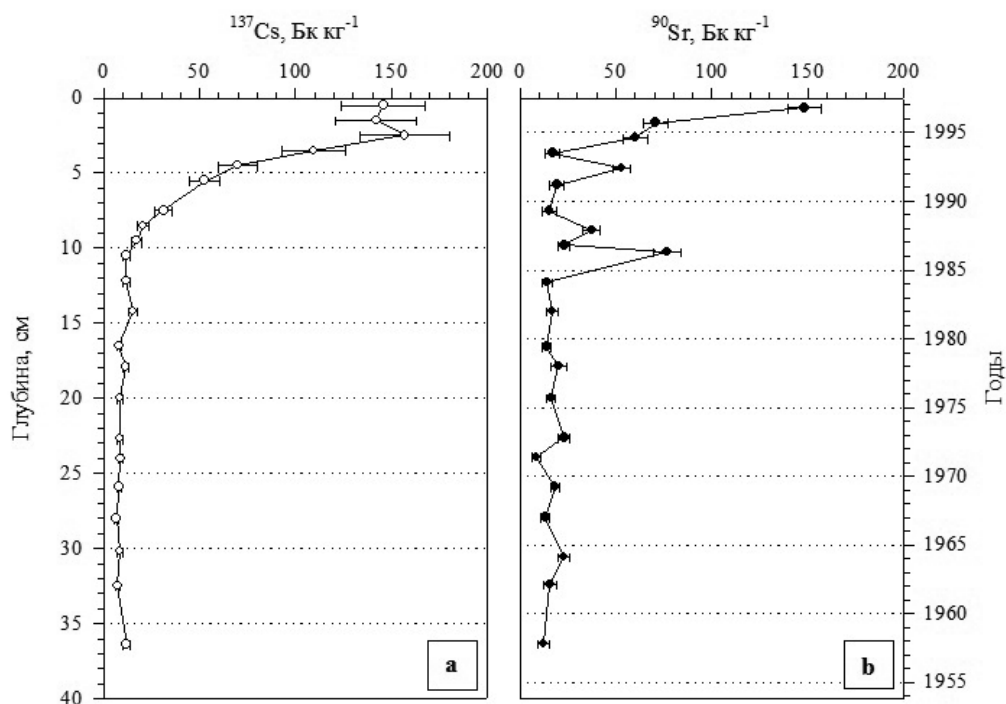


Рис. 7.5.3. Вертикальные распределения и реконструкция хронологии поступления ¹³⁷Cs (a) [Гулин и др., 1997; Gulin et al., 1997; Поликарпов и др., 2008a] и ⁹⁰Sr (b) [Мирзоева и др., 2005; Мирзоева, 2008; Поликарпов и др., 2008a] в донные отложения района Днепроовско-Бугского лимана.

Первый максимум концентрации ⁹⁰Sr, как и первое увеличение концентрации ¹³⁷Cs в колонке донных отложениях, отобранных в районе Днепроовско-Бугского лимана (см. рис. 7.5.3), были приурочены к слою, соответствующему 1986–1987 гг., т.е. к периоду времени непосредственно после аварии на ЧАЭС. В вышележащих слоях донных отложениях наблюдается нарастание концентрации послеаварийных радионуклидов, что соответствует положению о продолжении хронического поступления данного радионуклида со стоком реки Днепр и заглублиению его в донные отложения [Поликарпов и др., 2008a]. В отличие от донных отложений Днепроовско-Бугского лимана, в донных отложениях у реки Чорох наибольшие пики ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr соответствовали периоду 1950–1968 гг. (период глобального выпадения ⁹⁰Sr на поверхность Земли) (см. рис. 7.5.4).

Такие различия в распределении бомбовых и «чернобыльских» радионуклидов обусловлены тем, что глобальные радиоактивные выпадения после ис-

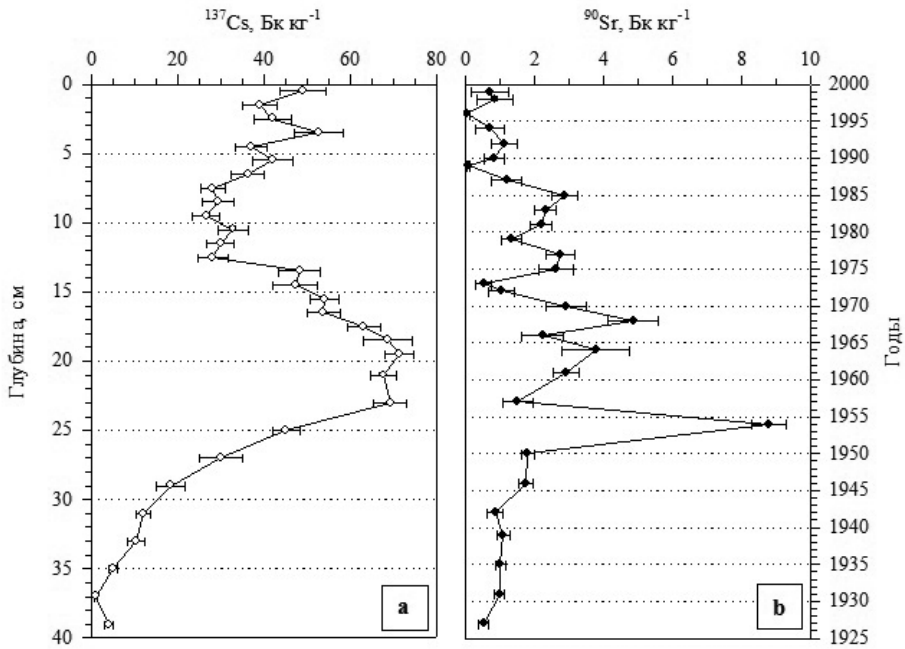


Рис. 7.5.4. Вертикальные распределения и реконструкция хронологии поступления ¹³⁷Cs (a) [Гулин и др., 1997; Gulin et al., 1997; Поликарпов и др., 2008a] и ⁹⁰Sr (b) [Мирзоева и др., 2005; Мирзоева, 2008; Поликарпов и др., 2008a] в донные отложения устьевой зоны реки Чорох.

пытания ядерного оружия были достаточно равномерными над всей акваторией Черного моря и территорией водосборного бассейна [Апллби и др., 1999], а выпадение радионуклидов после аварии на ЧАЭС было неравномерным, большая их плотность была обнаружена в северо-западной части Черного моря при вторичном поступлении с водами рек [Апллби и др., 1999; Громов и др., 1985; Гудков и др., 2001].

С использованием ⁴⁰K в качестве радиотрассера [Гулин и др., 2013] и при сопоставлении полученных результатов с результатами других радиотрассерных методов, которые применяются для типизации морских донных отложений [Гавшин и др., 1988; Гулин и др., 1997, 2008; Gulin et al., 1997, 2002; Мирзоева и др., 2005; Мирзоева, 2008], была выполнена дифференцированная оценка седиментации и скорости биогенного (рис. 7.5.5) и литогенного осадконакопления в Черном море.

Это позволяет определить вклад биоседиментации в суммарный процесс накопления донных осадков, проследить ее изменение во всем диапазоне глубин черноморского бассейна, а также выявить зоны преимущественного осаднения аллохтонной и автохтонной взвеси.

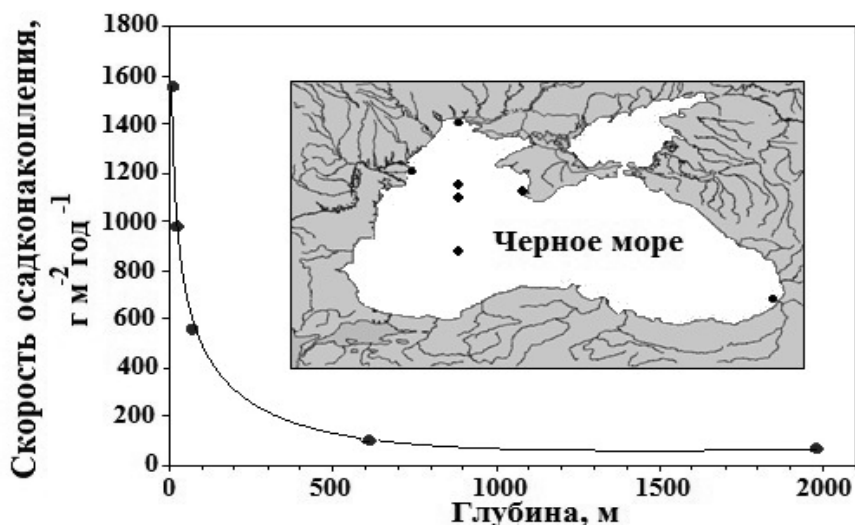


Рис. 7.5.5. Скорость биогенного осадконакопления на разных глубинах Черного моря [Гулин и др., 2013] (точками на карте показано расположение станций отбора проб).

Скорости седиментации и осадконакопления в различных районах Черного моря, рассчитанные с применением всех вышеуказанных методов использования радиотрассеров для геохронологии донных осадков, представлены в табл. 7.5.1, 7.5.2.

С использованием ^{90}Sr в качестве радиотрассера для определения возраста донных отложений были выполнены оценки скорости седиментации и осадконакопления в акватории Черного моря вдоль побережья Крыма (см. табл. 7.5.1¹, 7.5.2), а также в районах струйных метановых газовыделений из дна (рис. 7.5.6) [Мирзоева, 2012; Мирзоева и др., 2013].

Обнаружение струйных метановых газовыделений со дна на различных глубинах Черного моря [Егоров и др., 2011] вызвало значительный научный и практический интерес в связи с необходимостью изучения экологической и средообразующей роли этого ранее не известного хемозкологического фактора, а также энергетического ресурса и поискового признака при разведке морских углеводородных месторождений.

Показано (см. рис. 7.5.6), что детектируемые концентрации ^{90}Sr в колонках донных отложений, отобранных из районов грязевых вулканов, определяются в слоях от 40 см до 535 см (см. отбор проб на судне «Метеор» 2011 г., рис. 7.5.6). Биогеохимические и физические процессы, происходящие в районах грязевых

Таблица 7.5.1

Скорость осадконакопления (SR) и седиментации (MAR, общее (*), биогенное (**)) в различных акваториях Черного моря

[Гулин и др., 1997, 2008, 2013; Gulin et al., 1997; Мирзоева, 2010]

Район	Коорд. с.ш. / в.д.	Глубина, м	Биогенное вещество, %	SR, мм·год ⁻¹	MAR, г·м ⁻² ·год ⁻¹
Северо-западная часть					
Взморье Дуная	45°12,4' 29°51,0'	26	24,6	11,5	3994*
					983**
Днепровско-Бугский лиман	46°33,0' 31°25,0'	13	42,3	9,2	3670*
					1552**
Континентальный склон	44°39,4' 31°46,2'	607	75,0	2,2	138*
					104**
Глубоководная зона					
Западная халистаза	43°26,0' 32°08,8'	1983	94,6	0,4	70*
					66**
Восточная часть					
Устье р. Чорох	41°39,7' 41°33,2'	70	18,2	5,3	3071*
					559**
Севастопольская бухта					
Инкерман	44°36,4' 33°36,0'	4	32,4	9,3	7094*
					2298**
Голландия	44°37,3' 33°33,7'	15	11,6	3,3	1727*
					200**
Павловский мыс	44°37,1' 33°32,1'	15	18,2	2,4	607*
					110**
Константиновский равелин	44°37,5' 33°31,3'	13	46,8	4,6	3253*
					1521**
Внешний рейд Севастополя	44°37,1' 33°28,9'	22	72,6	2,3	664*
					482**
Стрелецкая бухта ¹	44°36,5' 33°28,1'	4	не определено	3,5	830*

¹Использование ⁹⁰Sr в качестве радиотрассера. ⁴⁰K в донных отложениях этого района не определялся.

вулканов Черного моря, увеличивают в 2,2–24,5 раза скорость осадконакопления и в 4–95 раз скорость седиментации по сравнению с районами моря, расположенными на сходных глубинах и имеющие сходную гидрологию, но где грязевые вулканы отсутствуют (см. табл. 7.5.1, 7.5.2, рис. 7.5.6).

Таблица 7.5.2

Скорость осадконакопления (SR) и седиментации (MAR) в акватории Черного моря вдоль побережья Крыма

[Мирзоева, 2012; Мирзоева и др., 2013]

Район	Коорд. с.ш. / в.д.	Глубина, м	SR, мм·год ⁻¹	MAR, г·м ⁻² ·год ⁻¹
Карадаг (Ст. 1)	44°54,7' 35°24,7'	45	5,5	2245,0
Карадаг (Ст. 4)	44°41,6' 35°33,1'	600	4,1	1133,3
Мыс Херсонес (Ст. 13)	44°25,2' 33°06,2'	290	5,6	2512,7
Балаклавская бухта (Ст. 1)	44°30,1' 33°35,8'	7,7	5,2	2218,9
Балаклавская бухта (Ст. 2)	44°29,9' 33°35,9'	12	5,5	3519,5
Балаклавская бухта (Ст. 3)	44°29,7' 33°35,7'	27	5,3	2131,2

Таким образом, применение методов хронологической датировки с использованием природных (⁴⁰K, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra) и искусственных (⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs) радионуклидов в качестве радиотрассеров позволило определить скорость седиментации и осадконакопления в исследуемых районах моря.

С применением радиотрассера ⁴⁰K разработан метод дифференцированной оценки скорости биогенного и литогенного осадконакопления в Черном море, что позволяет определить вклад биоседиментации в суммарный процесс накопления донных осадков, а также выявить зоны преимущественного осаждения аллохтонной и автохтонной взвеси во всем диапазоне глубин черноморского бассейна. Впервые выполнены исследования по определению скорости седиментации и осадконакопления в районах газовыделений из дна Черного моря, что необходимо для изучения физических и биогеохимических характеристик струйных газовыделений. Определено, что биогеохимические и физические процессы, происходящие в районах грязевых вулканов Черного моря, увеличивают в 2,2–24,5 раза скорость осадконакопления и в 4–95 раз скорость седиментации по сравнению с районами моря, расположенными на сходных глубинах, но где грязевые вулканы отсутствуют.

Практическая значимость проводимых исследований заключается в том, что рассчитанные скорости седиментации, являясь факторами самоочищения водной толщи морской экосистемы, позволяют определить потоки поступления и ско-

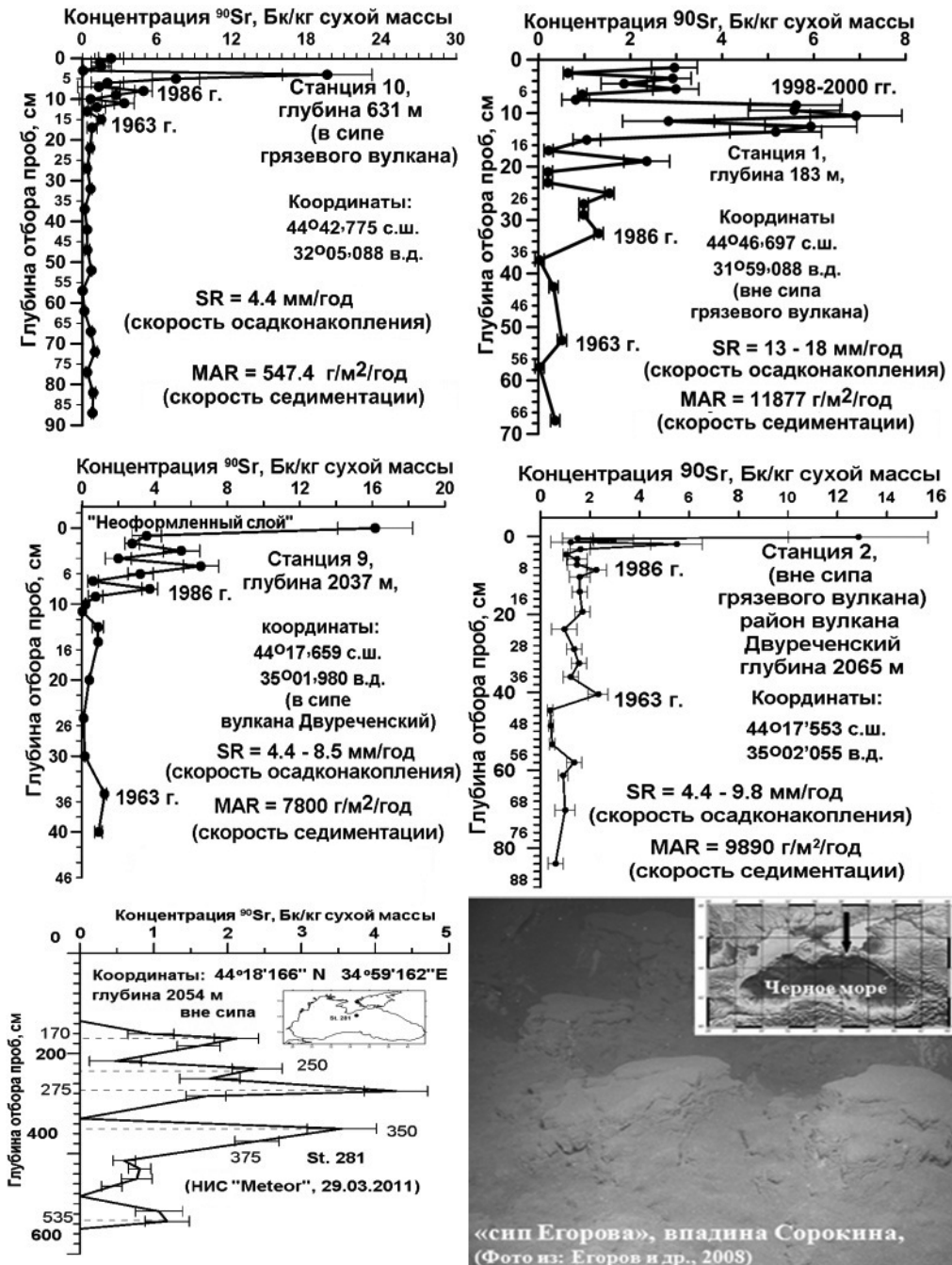


Рис. 7.5.6. Распределение ⁹⁰Sr в слоях донных отложений, расчет скорости седиментации и осадконакопления в донных отложениях районов струйных метановых газовыделений из дна Черного моря.

рость депонирования радиоактивных и консервативных химических загрязнителей в донные отложения различных районов Черного моря.

Сопоставление хронологической датировки и скорости осадконакопления с концентрацией загрязняющих веществ в толще донных осадков является «био-геохимическими часами», позволяющими восстановить всю историю загрязнения экосистемы Черного моря загрязнителями ядерной и неядерной природы, выявить закономерности реакции морской экосистемы на различные техногенные аварии, спрогнозировать экологические последствия при возможных аварийных ситуациях в изученном регионе.