

УДК 551.35:539.163(269)

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ ПРОЛИВА БРАНСФИЛД (ЗАПАДНАЯ АНТАРКТИКА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРИЯ-234 В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО РАДИОТРАССЕРА

С.Б. Гулин, Э.З. Самышев, Н.А. Стокозов, А.А. Сысоев

*Институт биологии южных морей, пр. Нахимова 2, Севастополь, e-mail: ibss@ibss.iuf.net*

**Реферат.** Проведены измерения содержания взвешенной и растворенной формы природного радионуклида  $^{234}\text{Th}$  в поверхностном слое водной толщи пролива Брансфилд. Обнаруженный дефицит концентрации суммарного тория-234 по сравнению с его долгоживущим материнским радионуклидом – ураном-238 позволил получить количественные оценки скорости седиментации взвешенного вещества из фотической зоны. Наибольшая интенсивность седиментационных процессов отмечена в зоне взаимодействия водных масс, поступающих из моря Беллинсгаузена и моря Уэдделла. Суммарный поток взвеси из верхней 150-метровой толщи воды составил около  $2.2 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  в восточной части пролива и  $3.1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  в его западной акватории. Среднее время пребывания взвешенных частиц в 150-метровом слое составило около 105-120 суток, что соответствует длительности весенне-летнего периода, когда поверхность пролива освобождается ото льда, препятствующего развитию фитопланктонных сообществ.

**Оцінка швидкості седиментації завислої речовини поверхнього шару водної товщі протоки Брансфілд (західна Антарктика) з використанням торія-234 як природного радіотрасера.** С.Б. Гулін, Е.З. Самішев, М.О. Стокозов, О.О. Сисоєв

**Реферат.** Проведено виміри вмісту завислої і розчиненої форми природного радіонукліда  $^{234}\text{Th}$  у поверхньому шарі водної товщі протоки Брансфілд. Виявлений дефіцит концентрації сумарного торію-234 у порівнянні з його довгоживучим материнським радіонуклідом – ураном-238 дозволив одержати кількісні оцінки швидкості седиментації завислої речовини з фотичної зони. Найбільша інтенсивність седиментаційних процесів виявлена в зоні взаємодії водних мас, що надходять з моря Белінсгаузена і моря Уеддела. Сумарний потік суспензії з верхньої 150-метрової товщі води склав приблизно  $2.2 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{доб}^{-1}$  у східній частині протоки і  $3.1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{доб}^{-1}$  у її західній акваторії. Середній час перебування завислих часток у 150-метровій товщі склав приблизно 105-120 діб, що відповідає тривалості весняно-літнього періоду, коли поверхня протоки звільняється від льоду, який перешкоджає розвитку фітопланктону.

**Abstract.** Measurements of particulate and dissolved  $^{234}\text{Th}$  have been carried out in the surface waters across the Bransfield Strait. The disequilibrium discovered between concentrations of the total  $^{234}\text{Th}$  and its soluble long-lived mother radionuclide –  $^{238}\text{U}$  has allowed an evaluation of particle fluxes in the euphotic zone. The highest flux was found in a mixing zone of waters coming from the Bellingshausen Sea and the Weddell Sea. Total particle fluxes from the upper 150-m water column are estimated of about  $2.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  in the eastern part of the Strait and  $3.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  in the western area. Residence time of the sinking particles in the upper 150 m is assessed to be in the range of 105 to 120 days, which corresponds with the duration of spring-summer months when the Strait is free from the ice cover limiting of the development of phytoplankton assemblages.

**Keywords:** suspended matter, particle flux, thorium-234, Bransfield Strait, Antarctica.

### 1. Введение

Интерес к изучению седиментации взвешенного вещества в различных акваториях Мирового океана обусловлен, прежде всего, ролью этих процессов в обеспечении баланса биологической продукции и деструкции органического углерода в водной толще, а также в накоплении донных осадков, формирующих современный облик океанского дна (Honjo, 1980; U.S. GOFS, 1989). В совокупности с процессами фотосинтеза фитопланктонных сообществ, оседание биогенной взвеси из поверхностного слоя гидросферы является ключевым механизмом в удалении избыточного количества углекислого газа из атмосферы, что, в конечном счете, влияет на тепловой баланс планеты (U.S. GOFS, 1989). Кроме того, седиментация взвешенного вещества имеет определяющее значение для самоочищения водной

среды морей и океанов от загрязняющих и эвтрофирующих веществ антропогенного происхождения (Поликарпов и др., 1986).

Исследование седиментационных процессов в антарктических водах имеет особую актуальность, учитывая чрезвычайно высокую чувствительность этой уникальной экосистемы к климатическим изменениям и антропогенному воздействию (Vörsena et al., 2002). Известно, что в большинстве прибрежных акваторий Антарктики седиментационные потоки взвешенного вещества характеризуются относительно низкими величинами по сравнению с другими районами Мирового океана (Honjo, 1990). Вместе с тем, в ряде акваторий, прежде всего в море Росса и вблизи Антарктического полуострова, потоки биогенной и литогенной взвеси могут быть на порядок выше, чем в других частях Южного океана (Palanques et al., 2002). Причем, одним из самых продуктивных районов, отличающихся достаточно высокой интенсивностью седиментационных процессов, является пролив Брансфилд, расположенный между Антарктическим полуостровом и архипелагом Южных Шетландских островов в атлантическом секторе Антарктики (Huntley et al., 1991).

В предшествующих исследованиях, выполненных с помощью седиментационных ловушек, была изучена сезонная изменчивость оседания взвеси из водной толщи пролива Брансфилд (Wefer et al., 1988; Palanques et al., 2002). В этих работах было показано, что более 95% суммарного годового потока взвешенных частиц в верхней толще воды данной акватории Антарктики приходится на весенне-летний период. Причем, более 50% оседающего материала имеет биогенное происхождение и образовано, в основном, остатками одноклеточных водорослей и фекальными пеллетами криля (Dunbar, 1984; Wefer et al., 1988; Самышев, 1991; Palanques et al., 2002).

Вместе с тем, из-за сложности использования седиментационных ловушек в непосредственной близости от поверхности моря, они устанавливались на глубинах несколько сотен метров, т.е. значительно ниже зоны минерализации органического вещества. Очевидно, что полученные при этом результаты характеризовали седиментационный перенос существенно трансформированной органики. Кроме того, показано, что седиментационные ловушки, установленные на больших глубинах в проливе Брансфилд, могут улавливать значительное количество взвеси, поступающей в составе латерального потока частиц из прибрежной зоны и со склонов подводных каньонов (Palanques et al., 2002).

В связи с этим, для изучения седиментационных процессов в поверхностном слое водной толщи широкое распространение получило использование природных радионуклидов в качестве трассеров переноса взвешенных веществ (U.S. GOFs, 1989). Наиболее приемлемым считается торий-234, который, в отличие от своего материнского радионуклида урана-238, проявляет в морской среде сорбционную реактивность и накапливается взвесью до высоких уровней. Из-за больших различий периодов полураспада  $^{238}\text{U}$  (4.5 млрд. лет) и  $^{234}\text{Th}$  (24.1 суток), гравитационный вынос взвешенного вещества из верхнего слоя водной толщи вызывает заметное отклонение содержания тория от изотопного равновесия с ураном. Это позволяет количественно оценивать интенсивность седиментационного переноса различных элементов в морской среде (Buesseler, 1991; Cochran et al., 2000). Кроме того, ранее было показано, что использование тория-234 особенно эффективно для изучения седиментационных процессов в районах поверхностных круговоротов и фронтальных зон (Гулин и др., 1995; Gulin, 2000). Это обстоятельство представляется особенно актуальным для изучения пролива Брансфилд, который характеризуется наличием зоны смешения вод, поступающих из моря Беллинсгаузена и моря Уэдделла (Palanques et al., 2002). Поэтому целью настоящей работы была оценка скорости седиментации взвешенного вещества из поверхностного слоя водной толщи пролива Брансфилд вдоль разреза, пересекающего фронтальную зону между этими водными массами.

## 2. Материалы и методы исследования

Исследования были выполнены в марте 2002 г. во время 7-й Украинской антарктической экспедиции. Отбор проб проведен на четырех комплексных станциях в восточной (ст. 52), центральной (ст. 38, 45) и западной (ст. 28) части пролива Брансфилд (рис. 1). В соответствии с

гидрологическими данными, полученными в этой экспедиции отрядом океанографии (Артамонов Ю.В., Перов А.А.), в районе станции 52 было обнаружено присутствие вод из моря Уэдделла, тогда как западная акватория пролива характеризовалась поступлением вод из моря Беллинсгаузена. Фронтальная зона, разделяющая эти две водные массы, пересекала пролив Брансфилд примерно в районе расположения станции 38.

На всех указанных станциях были отобраны 400-литровые пробы поверхностной воды, а на станциях 52 и 28 пробоотбор осуществлялся также на различных горизонтах верхнего 150-метрового слоя водной толщи. Поверхностную воду отбирали с помощью заборного

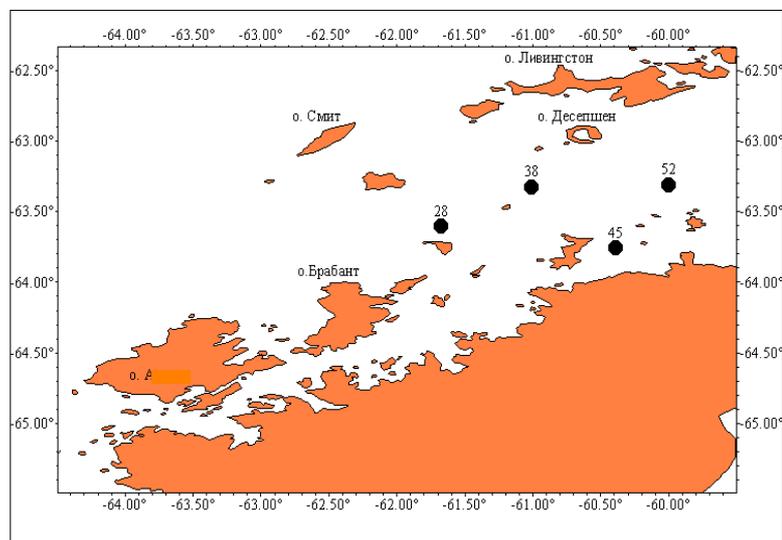


Рис. 1. Карта расположения станций.

силиконового шланга и перистальтического насоса MasterFlex I/P 7591-55. Вода из подповерхностных горизонтов была отобрана с использованием 20-литрового пластикового батометра Нискина. Воду прокачивали через нитроцеллюлозные мембранные фильтры Millipore диаметром 293 мм и номинальным размером пор 0.45 мкм. Фильтрат собирали в 25-ти литровые пластиковые контейнеры, в которых проводили радиохимическое осаждение растворенной фракции тория-234 в соответствии с методикой, изложенной в работах (Rutgers van der Loeff et al., 1999; Buesseler et al., 2001). Для этого в пробы добавляли щелочной буфер (25%-ный раствор аммиака) и носитель (насыщенный раствор  $\text{KMnO}_4$ ). После перемешивания вносили раствор хлорида марганца для образования взвеси микрокристаллов  $\text{MnO}_2$ , сорбирующих растворенный торий. Взвесь фильтровали через нитроцеллюлозные фильтры Millipore (293 мм, 0.45 мкм). Содержание  $^{234}\text{Th}$  на фильтрах с взвешенным веществом и с осадком  $\text{MnO}_2$  определяли методом прямой жидкостно-сцинтилляционной бета-спектрометрии при помощи анализатора 1209-RackBeta, установленного на борту судна. Повторные измерения этих проб были произведены через 24 дня, что соответствовало периоду полураспада тория-234 и позволило определить значение остаточного радиоактивного фона для каждой пробы. Содержание урана-238 рассчитывали по величине солености воды на соответствующем горизонте, используя общепринятую формулу:  $^{238}\text{U} (\text{распады} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{л}^{-1}) = 0.0686 \cdot S \text{ ‰}$  (Chen et al., 1986).

Содержание взвешенного вещества в водной толще определяли весовым методом. Для этого пробы воды объемом до 3 литров, отобранные 20-ти литровым пластиковым батометром Нискина, фильтровали под слабым вакуумом (-0.2 атм.) через мембранные фильтры Millipore диаметром 47 мм и размером пор 0.45 мкм, предварительно взвешенные на аналитических весах с точностью до 5 мкг. Фильтры затем промывали дистиллированной водой для удаления

морских солей из отфильтрованной взвеси, сушили до постоянного веса при температуре около 40°C, и повторно взвешивали для определения массы взвешенного вещества.

### 3. Результаты исследования. Обсуждение

Наименьшее содержание взвешенного тория-234, измеренное в поверхностном слое водной толщи, было обнаружено на станции 38, расположенной в зоне смешения вод из моря Беллинсгаузена и моря Уэдделла (рис. 2А). Концентрация растворенного тория-234, составившая 69-99 % от его суммарного содержания в поверхностном слое воды, была минимальной в западной части полигона (ст. 28), показав обратную зависимость долготного

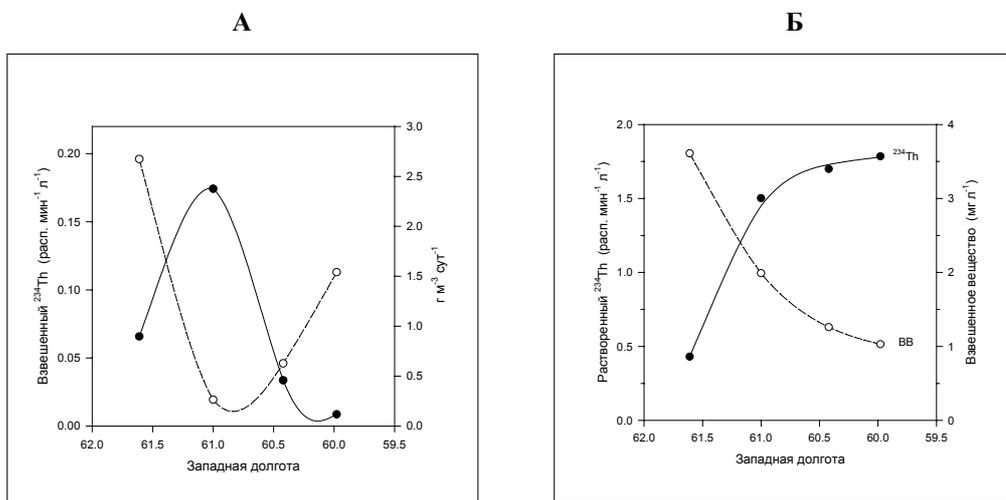


Рис. 2. Содержание взвешенного (○, А) и растворенного тория-234 (●, Б), взвешенного вещества (○, Б) и скорость седиментации (●, А) в поверхностном слое водной толщи пролива Брансфилд.

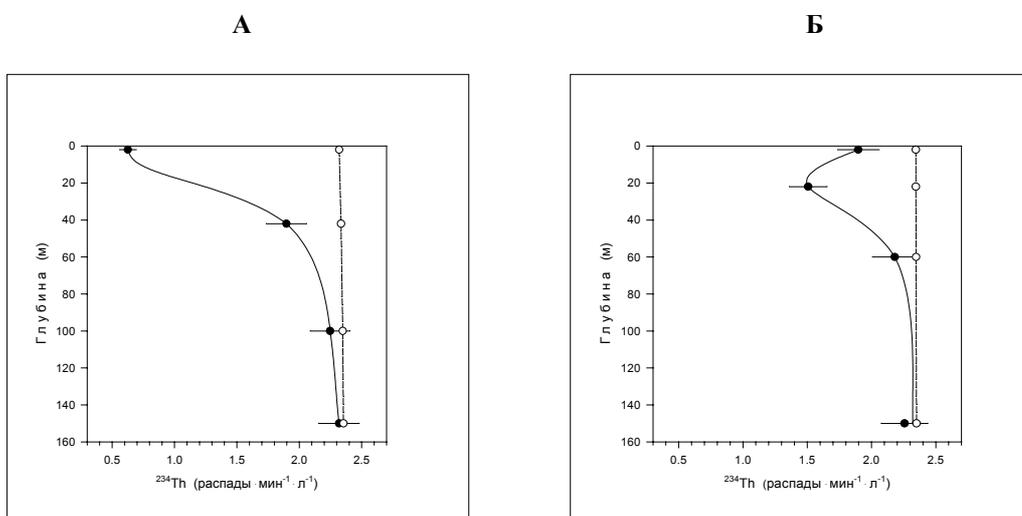


Рис.3. Вертикальное распределение тория-234 (●) и урана-238 (○) в водной толще западной (А) и восточной (Б) части пролива Брансфилд (RT – период биогеохимического круговорота взвешенного вещества в поверхностном 150-метровом слое).

распределения по сравнению с содержанием взвешенного вещества (рис. 2Б). Это указывает на то, что в поверхностном слое западной части пролива Брансфилд происходила наиболее интенсивная сорбция растворенного тория частицами взвеси с последующим его седиментационным удалением в нижележащую водную толщу. Эта закономерность была обнаружена и при оценке вертикального распределения тория-234, выполненной в западной и восточной части полигона.

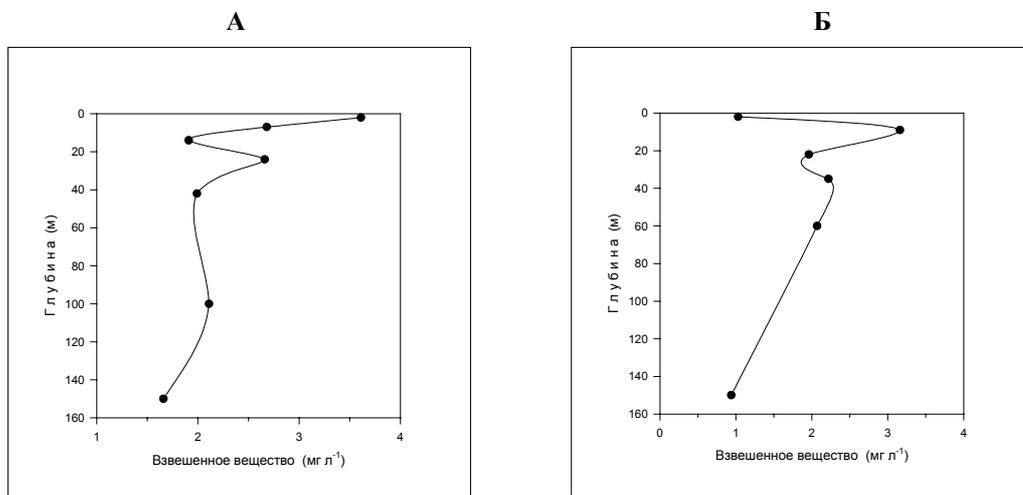


Рис. 4. Вертикальное распределение взвешенного вещества в водной толще западной (А) и восточной (Б) части пролива Брансфилд (SR – седиментационный поток взвешенного вещества из верхнего 150-метрового слоя).

На станции 28 наибольшее отклонение содержания тория от равновесия с ураном наблюдалось в самом верхнем слое воды (рис. 3А), тогда как в восточной части пролива (ст. 52) распределение тория имело подповерхностный минимум, расположенный у нижней границы фотической зоны (рис. 3Б). Эти различия соответствовали характеру вертикального распределения взвешенного вещества на указанных станциях, т.к. в западной части полигона (ст. 28) наибольшее содержание взвеси было обнаружено в поверхностном горизонте водной толщи (рис. 4А), а на станции 52 – в нижележащем слое фотической зоны (рис. 4Б).

Для расчета скорости седиментации взвешенного вещества из поверхностного слоя воды была использована стационарная модель, предполагающая, что вклад турбулентной диффузии и вертикальной адвекции водных масс незначителен по сравнению со скоростью образования и распада <sup>234</sup>Th (Buesseler, 1991):

$$P_{Th} = \lambda \cdot ({}^{238}U - {}^{234}Th), \quad (1)$$

где  $P_{Th}$  – скорость седиментации взвешенного <sup>234</sup>Th (распады·мин<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>·сут<sup>-1</sup>);

$\lambda$  – константа радиоактивного распада <sup>234</sup>Th (0.0288 сут<sup>-1</sup>);

${}^{238}U$  – содержание урана (распады·мин<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>);

${}^{234}Th$  – суммарная концентрация взвешенного и растворенного <sup>234</sup>Th (распады мин<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>).

Полученные значения делили на величину удельного содержания тория в суммарной взвеси ( ${}^{234}Th_{B:BB}$ , распады·мин<sup>-1</sup>·г<sup>-1</sup>), определяя скорость седиментации взвешенного вещества (г·м<sup>-3</sup>·сут<sup>-1</sup>):

$$P_{BB} = \frac{P_{Th}}{{}^{234}Th_{B:BB}}. \quad (2)$$

Период биогеохимического круговорота взвешенного вещества в исследуемом слое (RT, сутки), рассчитывали по соотношению содержания взвешенного тория ( $^{234}\text{Th}_B$ , распады  $\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}$ ) к скорости его седиментации ( $P_{Th}$ , распады  $\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ ):

$$RT = \frac{{}^{234}\text{Th}_B}{P_{Th}} \quad (3)$$

Скорость седиментационного выноса тория-234 из поверхностного слоя водной толщи, рассчитанная по формуле (1), закономерно убывала от западной к восточной части полигона (48.7 распады  $\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  на станции 28; 23.1 распады  $\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  на станции 38; 16.7 распады  $\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  на станции 45 и 12.9 распады  $\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  на станции 52). Эта закономерность полностью совпадает с упомянутым выше долготным распределением взвеси в поверхностном слое воды пролива Брансфилд (рис. 2Б). Вместе с тем, скорость седиментации суммарного взвешенного вещества, определенная по формуле (2), оказалась существенно выше в центральной части долготного разреза (ст. 38), чем в восточной и западной акваториях пролива (рис. 2А). Это свидетельствует о том, что в фронтальной зоне пролива Брансфилд, где происходит смешение водных масс из моря Уэдделла и моря Беллинсгаузена, биогеохимические процессы, связанные с формированием и седиментацией взвешенного вещества, протекают значительно более интенсивно. Достаточно отметить, что т.н. “резидентное” время (RT) пребывания частиц взвеси в поверхностном слое воды на станции 38 не превышало одних суток, тогда как в восточной и западной части полигона оно составило 9 и 4 суток, соответственно (рис. 3).

Послойное интегрирование значений скорости седиментации, полученных на отдельных горизонтах (ст. 28 и 52), позволило оценить суммарный поток взвеси из всего 150-ти метрового слоя поверхностной водной толщи. Эти расчеты показали, что интегральный поток взвешенного вещества в восточной части пролива составляет около  $2.2 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , а в западной он равен примерно  $3.1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  (рис. 4). Эти величины сопоставимы со средним значением фотосинтетической продукции фитопланктона, полученным ранее в проливе Брансфилд и составляющим около 1 г органического углерода под  $\text{м}^2$  в сутки (Palanques et al., 2002). Причем, время пребывания взвешенных частиц в верхней 150-ти метровой толще воды, рассчитанное по формуле (3) с использованием интегральных величин содержания взвешенного тория-234 и скорости его седиментации, составило около 120 суток в восточной части пролива и 105 суток в его западной акватории. Это соответствует средней длительности весенне-летнего периода, когда поверхность пролива освобождается от льда, препятствующего фотосинтезу фитопланктонных сообществ (DeMaster, 1987; Palanques et al., 2002).

Таким образом, применение тория-234 позволило определить интегральные характеристики седиментационного удаления взвешенного вещества из поверхностного слоя водной толщи пролива Брансфилд, а также установить, что наиболее активное оседание взвеси происходит в фронтальной зоне взаимодействия водных масс из моря Беллинсгаузена и моря Уэдделла.

**Благодарность.** Авторы выражают глубокую благодарность Украинскому антарктическому центру за предоставление уникальной возможности участвовать в 7-й Украинской антарктической экспедиции. Работа выполнена в рамках государственной программы Украины по изучению Антарктики.

### Литература

Гулин С.Б., Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. и др. Изучение сезонной динамики седиментационного выноса взвешенного вещества, биогенных элементов и загрязняющих веществ из поверхностного слоя воды Черного моря в период с 1992 по 1994 гг. // Геохимия. - 1995. - Т. 4, № 6. - С. 863-873.

Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. Морская динамическая радиохемозология. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. - 176 с.

- Самышев Э.З.** Антарктический криль и структура планктонного сообщества в его ареале. – Москва: Наука, 1991. - 168 с.
- Борсена М.А.,** Isla E., Plaza A. et al. Bioaccumulation record and paleoclimatic significance in the western Bransfield Strait. The last 2000 years // *Deep Sea Res. II.* - 2002. - Vol. 49. - P. 935-950.
- Buesseler K.O.** Do upper-ocean sediment traps provide an accurate record of particle flux? // *Nature.* - 1991. - Vol. 353. - P. 420-423.
- Buesseler K.O.,** Benitez-Nelson C., Rutgers van der Loeff M. et al. An intercomparison of small- and large-volume techniques for thorium-234 in seawater // *Marine Chemistry.* - 2001. - Vol. 74, № 1. - P. 15-28.
- Chen J.H.,** Edwards R.L., Wasserburg G.J.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  in seawater // *Earth and Planetary Science Letters.* - 1986. - Vol. 80. - P. 241-251.
- Cochran J.K.,** Buesseler K.O., Bacon M.P. et al. Short-lived thorium isotopes ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ) as indicators of POC export and particle cycling in the Ross Sea, Southern Ocean // *Deep-Sea Research II.* - 2000. - Vol. 47, № 15-16. - P. 3451-3490.
- DeMaster D.J.,** Nelson T.M., Nittrouer C.A. et al. Biogenic silica and organic carbon accumulation in modern Bransfield Strait sediments // *Antarctic Journal of the United States.* - 1987. Vol. 22. - P. 108-110.
- Dunbar R.B.** Sediment trap experiments on the Antarctic continental margin // *Antarctic Journal of the United States.* - 1984. - Vol. 19. - P. 70-71.
- Gulin S.B.** Seasonal changes of  $^{234}\text{Th}$  scavenging in surface water across the western Black Sea: an implication of the cyclonic circulation patterns // *Journal of Environmental Radioactivity.* - 2000. - Vol. 51, № 3. - P. 7-19.
- Honjo S.** Material fluxes and modes of sedimentation in the mesopelagic and bathypelagic zones // *Journal of Marine Research.* - 1980. - Vol. 38. - P. 53-97.
- Honjo S.** Particle fluxes and modern sedimentation in the polar oceans / W.O. Smith // *Polar Oceanography, Part B: Chemistry, Biology and Geology.* – New York: Academic Press, 1990. - P. 687-739.
- Huntley M.,** Karl D.M., Niiler P. et al. Research on Antarctic Ecosystem Rates (RACER): an interdisciplinary field experiment // *Deep-Sea Research.* - 1991. - Vol. 38. - P. 911-941.
- Palanques A.,** Isla E., Masque P. et al. Downward particle fluxes and sediment accumulation rates in the western Bransfield Strait: Implications of lateral transport for carbon cycle studies in Antarctic marginal seas // *Journal of Marine Research.* - 2002. - Vol. 60. - P. 347-365.
- Rutgers van der Loeff M.M.,** Moore W.S. Determination of natural radioactive tracers / K. Grasshoff, M. Ehrardt, K. Kremling // *Methods of Seawater Analysis.* – Weinheim: Verlag Chemie, - 1999. – chapter 13.
- U.S. GOFS.** Sediment trap technology and sampling / G. Knauer, V. Asper. // *U.S. Global Ocean Flux Study: Planning Report №10 of the Working Group on Sediment Trap Technology and Sampling.* – Woods Hole (USA): WHOI, 1989. - 94 p.
- Wefer G.,** Fisher G., Fütterer D.K., Gersonde R.. Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica // *Deep-Sea Research.* - 1988. - Vol. 35. - P. 891-898.