

Д.А.Кременчуцкий, О.А.Дымова, Г.Ф.Батраков

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ
В ЧЕРНОМ МОРЕ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НА ПРИМЕРЕ БЕРИЛЛИЯ-7 (${}^7\text{Be}$)**

Построена модель, описывающая эволюцию и трансформацию поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в водах Черного моря. По результатам численных экспериментов проанализирована пространственно-временная структура поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод моря в период с января по декабрь 2012 г. Установлено, что максимум концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое наблюдается в весенний период в юго-восточной части моря, минимум – в летний период в западной части моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бериллий-7 (${}^7\text{Be}$), Черное море, поверхностный слой, концентрация, пространственно-временная изменчивость

Исследования в области геохимии изотопов традиционно представляют большой интерес. Результаты таких исследований, зачастую, имеют большую практическую ценность, в частности, они открывают возможности к использованию изотопов в качестве трассеров процессов в окружающей среде. Одним из таких изотопов является бериллий-7 (${}^7\text{Be}$).

Бериллий-7 – это короткоживущий радионуклид космогенного происхождения ($T_{1/2} = 53,3$ дня), который образуется в атмосфере и выводится из нее преимущественно с потоком влажных атмосферных выпадений (осадков) [1]. Этот радионуклид также образуется и в морской воде, но этим источником можно пренебречь, поскольку согласно оценкам, представленным в [2], в верхнем 10 м слое океана образуется менее 0,5 % от содержания ${}^7\text{Be}$ в этом слое. Таким образом, поток ${}^7\text{Be}$ с осадками является доминирующим источником поступления радионуклида в водную толщу.

Информация о содержании и распределении ${}^7\text{Be}$ в морской среде может быть использована для изучения физических процессов в водах Мирового океана [3], в том числе, для исследования процессов субдукции и истории перемешивания слоев водных масс [4], оценке коэффициента вертикальный турбулентной диффузии и скорости апвеллинга [5].

Общее содержание ${}^7\text{Be}$ в верхнем квазиоднородном слое вод Мирового океана варьируется в интервале от 1 до 13 Бк/м³, относительное содержание ${}^7\text{Be}$ на взвеси изменяется от 0 до 100 % [5 – 10]. Отметим, что данные натуральных наблюдений содержания ${}^7\text{Be}$ в водах Черного моря сильно ограничены. Согласно имеющимся данным [11] в шельфовой зоне содержание радионуклида в верхнем перемешанном слое может изменяться в интервале от 0,9 до 5,1 Бк/м³.

Численное моделирование представляют собой удобный инструмент, позволяющий реконструировать и анализировать известные закономерности в интересующем нас регионе. Модели переноса радионуклидов традиционно представляют большой интерес и используются, в частности, для оценки состояния и прогнозирования изменений (в том числе катастрофи-

ческих) в исследуемой экосистеме. До настоящего времени действующая трехмерная модель переноса ${}^7\text{Be}$ в Черном море отсутствует.

Отметим, что существует ряд двумерных моделей, которые позволяют либо рассчитывать профиль вертикального распределения ${}^7\text{Be}$ и его временную изменчивость [4], либо, используя профиль вертикального распределения, оценить коэффициент вертикальной турбулентной диффузии [5].

Цель работы – выявить особенности пространственно-временной изменчивости поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря, используя методы численного моделирования.

Материалы и методы. В работе использовалась трехмерная нелинейная термогидродинамическая модель Морского гидрофизического института, дополненная блоком расчета распространения пассивной примеси. Математическая постановка задачи и численная реализация подробно описаны в [12, 13]. При моделировании физических процессов переноса примесь предполагается пассивной, т.е. радионуклид не оказывает влияния на физические характеристики морской среды. Уравнение переноса радионуклида в декартовых координатах x, y, z (оси направлены на восток, север и вертикально вниз соответственно) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial((W + pw_s)C)}{\partial z} = A^H \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C, \quad (1)$$

где C – общая концентрация радионуклида в растворенном и взвешенном состоянии; U, V, W – компоненты скорости течения; A^H – коэффициент при бигармоническом операторе – $5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^4/\text{с}$; A_V – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; λ – постоянная распада, $\lambda = \ln 2/\tau$; τ – период полураспада рассматриваемого радионуклида; w_s – скорость седиментации взвеси; p – доля содержания радионуклида во взвешенном состоянии от общего содержания. Скорость седиментации радионуклида на взвеси принималась равной $0,002 \text{ см/с}$ [14]. Доля радионуклида на взвеси определялась уравнением [11]:

$$p = K_d C_p, \quad (2)$$

где C_p – концентрация взвеси; K_d – коэффициент распределения радионуклида между растворенной и адсорбированной формами. Величина коэффициента K_d выбрана в соответствии с [11]:

$$K_d = 3,16 \cdot 10^5 C_p^{-0,8}. \quad (3)$$

Поля концентрации взвеси в поверхностном слое вод Черного моря были рассчитаны аналогично [15].

В качестве граничных условий на свободной поверхности ($z=0$) задавались поток радионуклида с сухими и влажными атмосферными выпадениями и поток оседающий на взвеси:

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} = F + pw_s C, \quad (4)$$

где $F(x, y, z)$ – поток радионуклида на поверхность. Влажный поток радионуклида задавался аналогично [16]. В отсутствии осадков предполагалось, что поступление ${}^7\text{Be}$ обусловлено потоком сухих выпадений, который при-

нимался равным $0,75 \text{ Бк/м}^2\text{сут.}$

Граничные условия на дне $z = H(x, y)$:

$$C_z = 0, \quad (5)$$

на твердых границах:

$$\partial C / \partial n = 0, \quad \partial(\nabla^2 C) / \partial n = 0, \quad (6)$$

в устьях рек и проливах:

$$C = \nabla^2 C = 0. \quad (7)$$

В начальный момент времени выполнялось условие:

$$C = C_0(x, y, z, t^0). \quad (8)$$

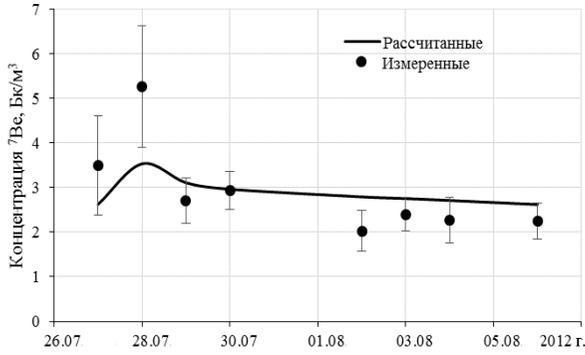
В блоке расчета термогидродинамических характеристик Черного моря в качестве граничных условий на поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение, рассчитанные по данным атмосферного реанализа *SKIRON* [17] и соответствующие выбранному временному интервалу. При расчете переноса радионуклида на поверхности использовались поля концентрации взвеси, полученные по данным спутника *MODIS* [15]. Все граничные поля линейно интерполировались на каждый момент времени.

Расчеты проводились на горизонтальной сетке $5 \times 5 \text{ км}$, по вертикали использовалось 45 горизонтов. Шаг по времени равнялся 5 мин.

В начальный момент t^0 задавались климатические поля температуры, солености, горизонтальных скоростей и уровня моря, которые соответствовали 1 января [18]. Поскольку данные о распределении ${}^7\text{Be}$ водах Черного моря сильно ограничены, начальное значение концентрации было выбрано очень малой ненулевой величиной, чтобы избежать ошибки, возникающей при конечно-разностной аппроксимации уравнения (1) на границе бассейна.

Интегрирование уравнений модели с соответствующими краевыми условиями проводилось в два этапа: с 1 января по 31 декабря 2011 г. и с 1 января по 31 декабря 2012 г. Цель первого этапа – согласовать климатические гидрофизические поля с реальным атмосферным форсингом и сформировать поле концентрации ${}^7\text{Be}$ в Черном море. Отметим, что 1 год модельных расчетов соответствует приблизительно 7 периодам полураспада ${}^7\text{Be}$, т.е. к 31 декабря 2011 г. от того количества радионуклида, что было задано на момент времени 1 января 2011 г., останутся доли процента. К 1 января 2012 г. запас ${}^7\text{Be}$ в Черном море будет распределен в соответствии с гидродинамическими полями. Анализ пространственно-временной изменчивости поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря проводился по результатам расчетов второго этапа. Под поверхностным слоем вод понимается 1 расчетный горизонт, соответствующий слою $0 - 2,5 \text{ м}$.

Результаты и их обсуждение. Валидация модели. Для валидации результатов моделирования использовались данные натуральных наблюдений, полученные на стационарной океанографической платформе в пос.Кацивели в летний сезон 2012 г. При валидации проводилось сопоставление величин суммарной концентрации ${}^7\text{Be}$ на глубине $1,25 \text{ м}$, полученных на океанографической платформе, с величинами суммарной концентрации ${}^7\text{Be}$, расчи-

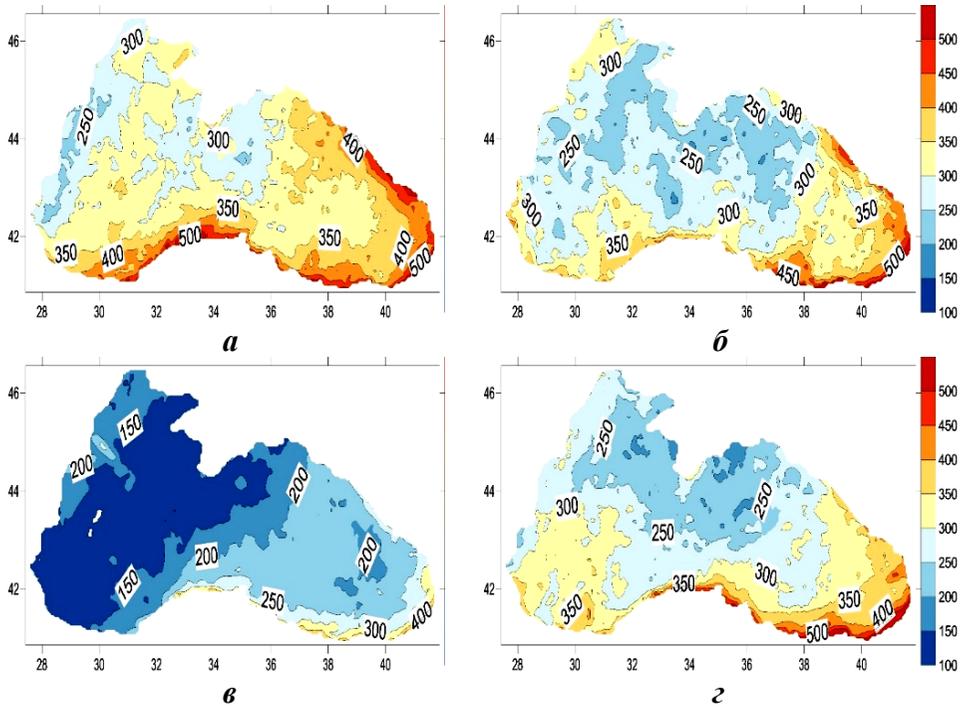


Р и с . 1 . Временная изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое моря в районе океанографической платформы в пос.Кацивели в июле – августе 2012 г.

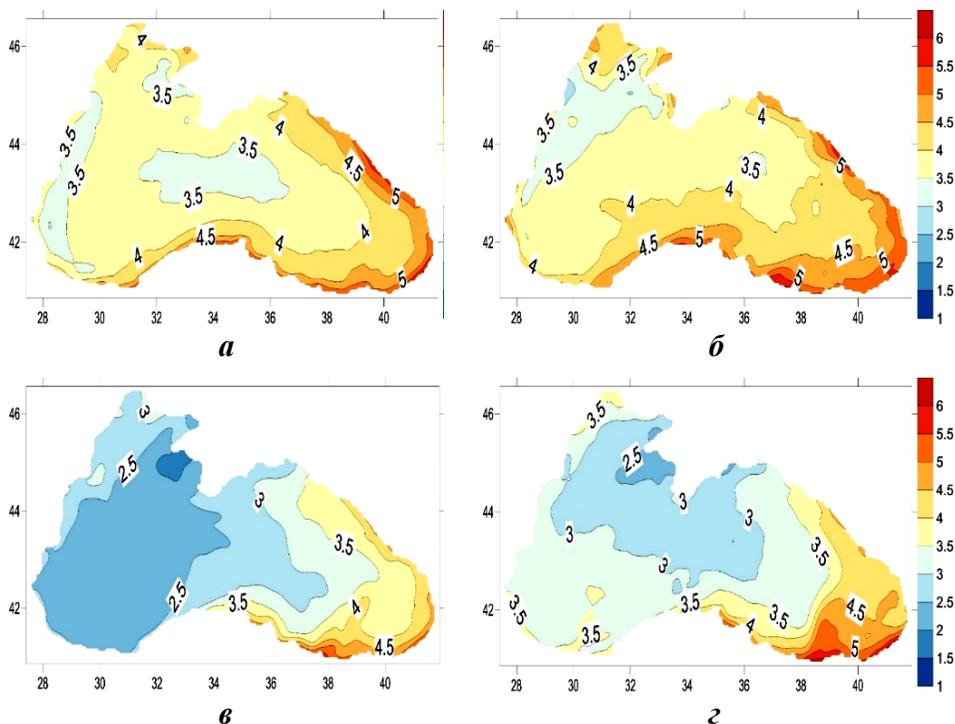
танными в слое 0 – 2,5 м (первый модельный слой) для ячейки, координаты которой соответствует положению океанографической платформы. По результатам сравнения видно (рис.1), что данные, полученные в ходе проведения численных экспериментов, хорошо согласуются с данными натурных наблюдений.

Пространственно-временная изменчивость поля потоков ${}^7\text{Be}$ в Черноморском регионе.

На рис.2 представлены результаты расчета величины потока ${}^7\text{Be}$ на поверхность Черного моря в различные сезоны 2012 г. Не приводя карты, отметим, что суммарная за год величина потока варьировалась от 700 до 1800 Бк/м²год. Полученный диапазон величин хорошо согласуется с данными натурных наблюдений, полученных на ряде станций, расположенных в средних широтах северного полушария [19 – 21]. Максимальные величины потоков наблюдаются в зимний период в восточной части моря, минимальные – в летний период в западной части моря. Такая внутри-



Р и с . 2 . Сезонная изменчивость поля потоков ${}^7\text{Be}$ (Бк/м²) в 2012 г.: зима (а), весна (б), лето (в), осень (г).



Р и с . 3. Сезонная изменчивость поля концентрации ${}^7\text{Be}$ (Бк/м²) в поверхностном слое вод Черного моря в 2012 г.: зима (а), весна (б), лето (в), осень (г).

годовая изменчивость потока ${}^7\text{Be}$ на подстилающую поверхность является типичной для регионов со средиземноморским типом климата.

Пространственно-временная изменчивость поля концентрации ${}^7\text{Be}$.

По результатам численных экспериментов были получены поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря в различные сезоны 2012 г. (рис.3). Так, концентрация ${}^7\text{Be}$ варьируется по пространству и во времени от 1,5 до 6 Бк/м³. Минимальные величины концентрации наблюдаются в летний период в западной части моря, максимальные величины наблюдаются в весенний период в восточной части моря. Отметим, что во времени минимальные величины меньше максимальных на 25 – 75 %. Полученные результаты не противоречат данным натуральных наблюдений [11].

Выводы. Разработана модель, позволяющая рассчитывать поле концентрации ${}^7\text{Be}$ в водах Черного моря. С использованием результатов натуральных наблюдений показано, что модель позволяет корректно воспроизводить эволюцию поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря.

Исследована пространственно-временная структура поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностных водах Черного моря. Установлено, что максимум концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое наблюдается в весенний период в юго-восточной части моря, минимум – в летний период в западной части моря.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Морского гидрофизического института РАН С.В.Станичному за предоставлен-

ные данные реанализа *SKIRON* и А.А.Кубрякову за предоставленные поля яркости восходящего излучения по данным сканера *MODIS*.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Фундаментальная океанология», № 0827-2014-0010) при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-05-00206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Series: Advances in Isotope Geochemistry* / Ed. by Baskaran M.– Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.– 951 p.
2. Lee T., Barg E., Lal D. Studies of vertical mixing in the Southern California Bight with cosmogenic radionuclides ^{32}P and ^7Be // *Limnol. Oceanogr.*– 1991.– 36(5).– P.1044-1053.
3. Lal D. An overview of five decades of studies of cosmic ray produced nuclides in oceans // *The Science of the Total Environment.*– 1999.– 237.– P.3-13.
4. Kadko D., Olson D. Beryllium-7 as a tracer of surface water subduction and mixed-layer history // *Deep Sea Res. I.*– 1996.– 43(2).– P.89-116.
5. Haskell W.Z., Kadko D., Hammond D.E., Knapp A.N., Prokopenko M.G., Berelson W.M., Capone D.G. Upwelling velocity and eddy diffusivity from ^7Be measurements used to compare vertical nutrient flux to export POC flux in the Eastern Tropical South Pacific // *Marine Chemistry.*– 2015.– 168.– P.140-150.
6. Andrews J.E., Hartin C., Buesseler K.O. ^7Be analyses in seawater by low background gamma-spectroscopy // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chem.*– 2008.– 277(1). – P.253-259.
7. Gosink I.A. On the use of cosmogenic radionuclides of beryllium for ocean transport studies // *Mar. Sci. Comm.*– 1976a.– 2(6).– P.413-417.
8. Nakanishi T., Kusakabe M., Aono T., Yamada M. Simultaneous measurements of cosmogenic radionuclides ^{32}P , ^{33}P and ^7Be in dissolved and particulate forms in the upper ocean // *J. Radioanalytical and Nuclear Chem.*– 2009.– 279(3).– P.769-776.
9. Silker W.B. Beryllium-7 and fission products in the Geosecs II water column and applications of their oceanic distributions // *Earth and Planetary Sc. Letters.*– 1972.– 16.– P.131-137.
10. Silker W.B. Horizontal and vertical distributions of radionuclides in the North Pacific ocean // *J. Geophysical Research.*– 1972.– 77(6).– P.1061-1070.
11. Кременчуцкий Д.А. Распределение бериллия-7 между взвешенным веществом и морской водой в шельфовой зоне Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь, 2013.– вып.27.– С.306-311.
12. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.– М.: ИВМ РАН, 1992.– 163 с.
13. Чудиновских Т.В., Дымова О.А. Численное моделирование полей концентрации пассивной примеси для оценки запаса ^{137}Cs в Черном море // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь, 2010.– вып.14.– С.182-187.
14. Багаев А.В. Трехмерная гидрофизическая модель транспорта и трансформации антропогенного стойкого хлорорганического загрязнения на шельфе Черного моря / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. н.– Севастополь, 2012.– 147 с.
15. Кременчуцкий Д.А., Кубряков А.А., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Станичный С.В., Алескерова А.А. Определение концентрации взвешенного вещества в

Черном море по данным спутника MODIS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2014.– вып.29.– С.5-9.

16. *Кременчуцкий Д.А., Коновалов С.К., Батраков Г.Ф., Станичный С.В.* Пространственно-временная изменчивость поступления бериллия-7 (^7Be) на поверхность Черного моря // Мат. научн. конф. с междунар. участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Часть 2.– Ростов-на-Дону, 8-10 сентября 2015 г.– Ростов-на-Дону, 2015.– С.247-251.
17. <http://forecast.uoa.gr/forecastnewinfo.php>
18. *Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В.* Построение поля течений в черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2007.– вып.15.– С.215-226.
19. *Lozano R.L., San Miguel E.G., Bolívar J.P., Baskaran M.* Depositional fluxes and concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain // J. Geophys. Res.– 2011.– 116.– D18213.
20. *Pham M.K., Povinec P.P., Nies H., Betti M.* Dry and wet deposition of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs in Monaco air during 1998-2010: Seasonal variations of deposition fluxes // J. Env. Radioact.– 2013.– 120.– P.45-57.
21. *Ioannidou A., Papastefanou C.* Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air // J. Env. Radioact.– 2006.– 85.– P.121-136.

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.
После доработки 16.05.2017 г.

D.A.Kremenchutskii, O.A.Dymova, G.F.Batnikov

INVESTIGATION OF RADIONUCLIDES CONCENTRATION FIELDS IN THE BLACK SEA BY NUMERICAL SIMULATION METHODS ON THE EXAMPLE OF BERYLLIUM-7 (^7Be)

A model describing the evolution and transformation of ^7Be concentration field in the Black Sea waters is built. Based on the results of numerical experiments the spatio-temporal structure of ^7Be concentration field in the surface layer of the sea during the period from January to December 2012 is analyzed. It was revealed that in the surface layer the maximum of the ^7Be concentration is observed in spring in the southeast part of the sea, the minimum – in summer in the western part of the sea.

KEYWORDS: beryllium-7 (^7Be), the Black Sea, the surface layer, concentration, spatial and temporal variability