



М. Н. Голенко, Н. Н. Голенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Методом численного гидродинамического моделирования изучено распространение пассивной примеси в прибрежной зоне отдельных районов Балтийского моря. Включение в численную модель дополнительного параметра, описывающего изменение концентрации пассивной примеси, а также ее сопряжение с моделью случайных блужданий лагранжевых частиц позволило выявить особенности динамики прибрежных вод при апвеллинге. Для различных ветровых воздействий были обнаружены возможности проникновения взвешенных частиц различного происхождения из прибрежной области в открытое море и в обратном направлении.

*This paper studies the passive tracer and Lagrange particle propagation in the coastal area of South-East Baltic using hydrodynamic numerical modeling. The inclusion of an additional parameter, which describes the variation of the passive tracer concentration as well as its connection with the Lagrange particle random walk model, into the model made it possible to identify the features of the coastal water dynamics during upwelling. The possibilities of the penetration of suspended particles of different origin from the coastal area into the open sea and vice versa are investigated.*

**Ключевые слова:** пассивная примесь, лагранжева частица, численное моделирование, динамика прибрежной зоны, Балтийское море.

**Key words:** passive tracer, Lagrange particle, numerical modeling, coastal water dynamic, Baltic Sea.

**Введение**

В настоящей работе рассматриваются задачи о распространении пассивной примеси и случайных блужданиях лагранжевых частиц в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). Исследования проводятся методом численного моделирования [1]. Определение примеси как пассивной в данной работе означает, что ее наличие в морской среде не влияет на поле плотности. В программный код модели была добавлена переменная, ее изменение описывается теми же уравнениями, что и изменение полей температуры и солености. Физический смысл новой переменной — концентрация пассивной примеси, в роли которой могут выступать различные химические элементы или вещества, присутствующие в морской среде.

Представленный район — область моделирования, на основе которого проводился анализ распространения пассивной примеси и траекторий лагранжевых частиц. Черной линией обозначено местоположение разреза  $Yan$ , где исследовались результаты моделирования пассивной примеси. Крестиками обозначены точки на разрезе  $Yan$ , из которых на глубине 35 м проводился запуск лагранжевых частиц.

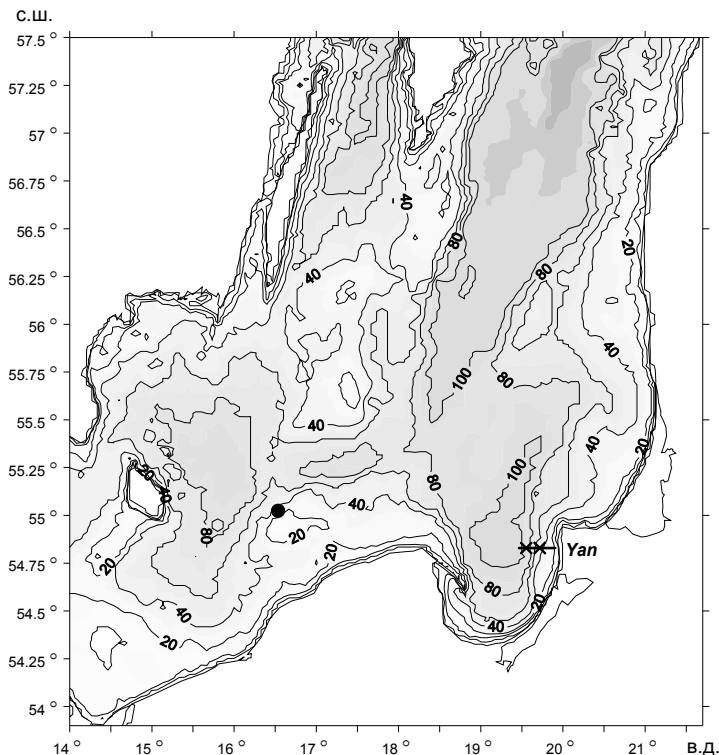


Рис. 1. Батиметрическая карта западной, центральной и юго-восточной частей Балтийского моря

Расчет траекторий частиц проводится на основе неизменного по времени, установившегося среднего поля течения при задании однородного по времени и пространству ветрового воздействия и стохастических приращений координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , имитирующих случайное рассеяние частиц за счет турбулентной диффузии. Приращения вычисляются по специальным формулам, применяемым к случайному смещению частиц в среде с неоднородной диффузивностью [4], какой является реальное (Балтийское) море.

Задача о распространении пассивной примеси и блуждающих лагранжевых частицах имеет ряд практических приложений, например исследование путей распространения различных веществ природного и антропогенного происхождения (осадочных взвесей, продуктов разложения затопленного в Балтике химического оружия) от придонного локального источника. В рамках разработанного модельного комплекса можно решать задачу распространения природных примесей и антропогенных веществ (синезеленых водорослей, нефтепродуктов) от поверхностных источников. Исследование траекторий частиц, выпущенных в различных слоях и областях моря, позволило выявить особенности взаимодействия вод (прибрежных и открытого моря) при различных гидродинамических процессах, таких как апвеллинг и даунвеллинг.



## Описание численных экспериментов по моделированию распространения пассивной примеси

Распространение пассивной примеси рассматривается на фоне процесса апвеллинга. Ранее при исследовании прибрежной динамики вод юго-восточной Балтики [2] было отмечено, что у западного побережья Самбийского п-ова, в районе пос. Янтарный в поле температуры апвеллинг проявляется раньше, чем в других областях, а в поле течений имеет каноническую структуру (в районе пос. Янтарный в шельфовой области моря наблюдается компактная наиболее интенсивная вдольбереговая струя шириной около 8 км. В поле поперечного к берегу компонента скорости в области склона четко выделяется структура, связанная с течениями, направленными к берегу.) С целью сопоставить результаты моделирования распространения пассивной примеси с ранее полученными результатами моделирования горизонтальной скорости течения и термохалинной структуры вод в области апвеллинга, в настоящей работе исследуется динамика примеси в районе западного побережья Самбийского п-ова.

Изучен перенос пассивной примеси из глубинных слоёв под термоклином при апвеллинге. Это позволило определить пространственные области, из которых происходит вовлечение. Были проведены следующие численные эксперименты по моделированию пассивной примеси при апвеллинге. Начальное распределение пассивной примеси было задано специальным образом: на расстоянии до 20 км от берега концентрация примеси была равна 0 от поверхности до дна; на расстоянии, большем 20 км от берега, концентрация примеси была равна 10 ед. глубже 35 м, снижаясь до нуля на глубине 33 м, выше этой глубины концентрация была равна 0. Было установлено, что на расстоянии от берега большем 20 км примесь не распространяется в сторону берега и далее к поверхности. В случае если примесь находилась на меньшем расстоянии от берега, она увлекалась компенсационным течением и оказывалась в приповерхностном слое.

Распределения поля температуры и концентрации пассивной примеси в начальный момент времени представлены на рисунке 2 *а, б, в*, а спустя 3 сут. ветрового воздействия, вызывающего апвеллинг, — на рисунке 2 *г, д, е*. Вдольбереговая и поперечная к берегу составляющие скорости в рассматриваемом районе при апвеллинге представлены на рисунке 2 *ж, з*, на рисунке 2 *и* приведено начальное распределение солёности:

- (*а*) — в полях температуры;
- (*б*) — концентрации пассивной примеси, принимающей в начальный момент времени ненулевые значения в слое от 33 м до дна на расстоянии  $\geq 10$  км от берега;
- (*в*) — на расстоянии  $\geq 20$  км от берега;
- (*г*), (*д*), (*е*) — те же распределения спустя 3 сут. ветрового воздействия северо-восточного направления, благоприятствующего апвеллингу. Скорость ветра в течение 1 сут. возрастала от 0 до 12 м/с, а затем оставалась неизменной;
- (*ж*), (*з*) — типичные распределения вдольбереговой и поперечной к берегу составляющих скорости в рассматриваемом районе при апвеллинге;

- (и) – начальное распределение солёности.

На распределениях (б) и (в) крестиками обозначены источники запуска лагранжевых частиц.

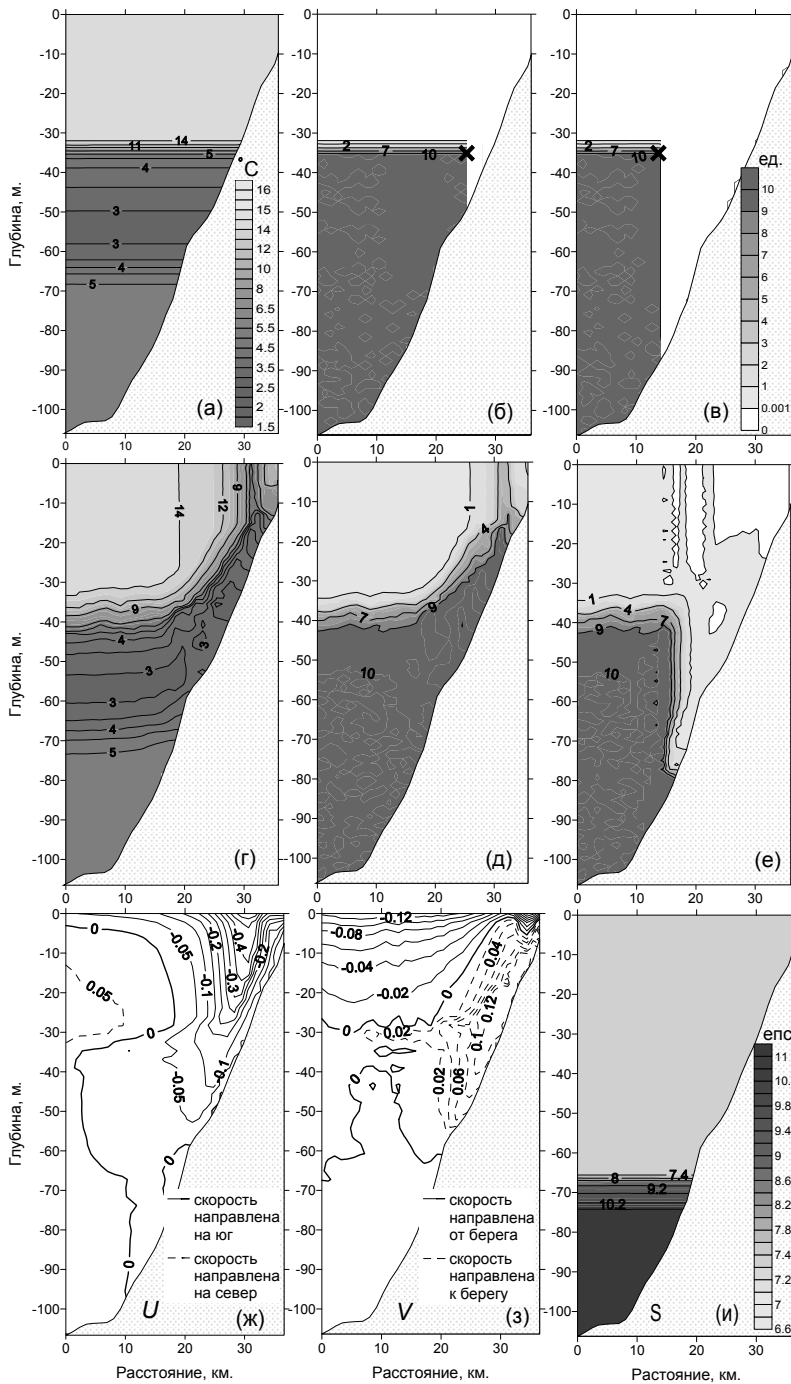


Рис. 2. Разрез Yan (на траверзе пос. Янгарный, рис. 1)



Было выполнено моделирование пассивной примеси при термохалинной стратификации, характерной в период конца зимы — начала весны, которая характеризуется почти однородным до 70 м слоем по температуре и солёности. Начальное поле концентрации примеси было задано однородным по горизонтали, а по вертикали оно соответствовало распределению, показанному на рисунке 3 (б) в той части разреза, где расстояние от берега > 20 км. Такой профиль приблизительно соответствует вертикальному распределению нитратов и фосфатов в отдельных районах Балтийского моря [3]. На рисунке 3 представлены результаты моделирования поля температуры и концентрации примеси при начальной термохалинной стратификации осеннего (а, б) и зимнего (в, г) типа при ветровом воздействии, благоприятствующем апвеллингу. Начальное поле концентрации пассивной примеси для обеих стратификаций было одинаковым. Несмотря на это, спустя 3 сут., в полях концентрации наблюдаются существенные различия (ср. рис. 3 б, г). В зимний период из-за высокого уровня вертикальной турбулентности в обширном слое от поверхности до 70 м происходит интенсивное вертикальное перемешивание примеси в пределах этих глубин и, как следствие, наблюдаются относительно высокие значения концентрации у поверхности. Глубже 70 м поле концентрации почти не подверглось изменению. В случае осенней стратификации интенсивное вертикальное турбулентное перемешивание не распространяется ниже термоклина (35 м), поэтому ниже этого слоя концентрация также существенно не изменилась.

Метод расчета траекторий частиц, используемый в настоящей работе, основан на схеме, подробно описанной в работе [4]. Важно отметить, что для расчета вертикальной компоненты случайного смещения частиц применялась формула, дающая корректное решение для среды с неоднородной диффузивностью, какой является реальное море.

Численные эксперименты проводились при задании однородных по времени и пространству западного и северо-восточного ветров различной интенсивности. Для расчета траекторий использовались данные скорости, относящиеся к моменту времени 3 сут., когда течения вышли на квазистационарный режим. Начальная термохалинная стратификация была задана однородной по горизонтали во всей области моделирования и соответствовала осеннему типу (рис. 2 а, и). Перед расчетом траекторий из данных скорости предварительно были отфильтрованы инерционные колебания. Необходимость фильтрации объясняется предположением использовать «замороженное» поле средних течений. Расчет траекторий проводился для 90 сут.

В результате серии модельных экспериментов по расчету траекторий лагранжевых частиц, выпущенных из придонных точек в различных областях исследуемого района при различных ветровых воздействиях, установлены следующие закономерности их распространения. При интенсивном апвеллинговом, северо-восточном ветре ~ 11 м/с частицы из прибрежной и склоновой областей распространяются вдоль береговой линии или склона на юго-запад, по направлению вдольберегового квази-геострофического течения, почти не оседая у берега. Начиная путь из области, расположенной на траверзе Куршской косы, большинство час-



тиц, достигнув западного побережья Самбийского п-ова, поворачивают направо и распространяются в направлении Гданьской впадины, а затем — на север, в открытое море (рис. 4 а). Незначительное число частиц сохраняют вдольбереговое направление на протяжении всего 90-дневного периода расчетов. Частицы, выпущенные в открытом море (например, на склоне Гданьской впадины), могут попасть в область прибрежного струйного течения и даже в шельфовую зону.

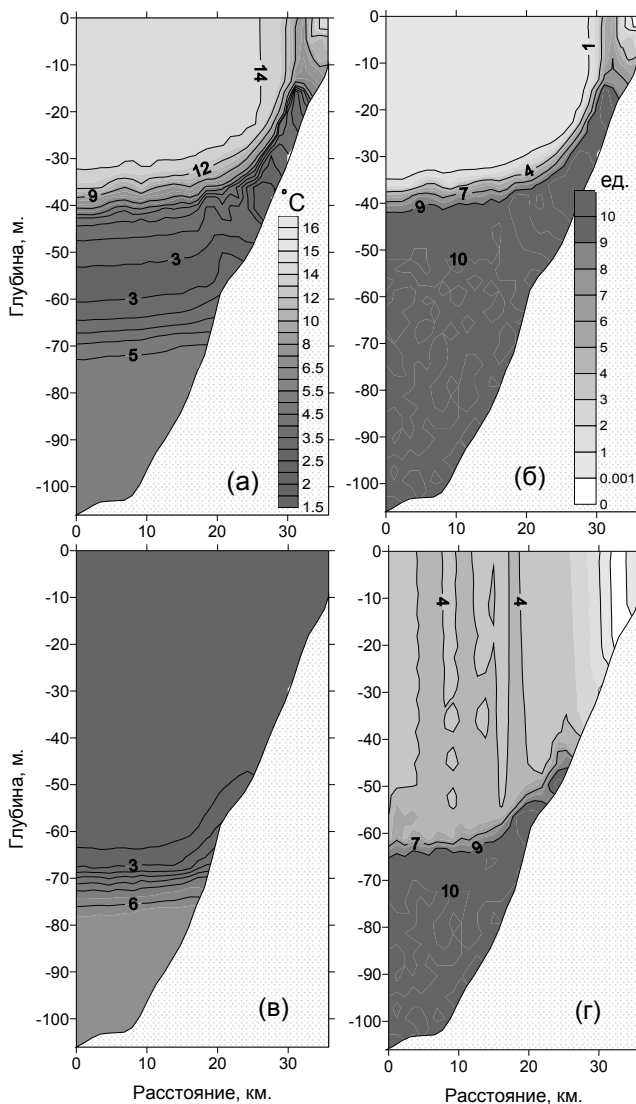


Рис. 3. Результаты моделирования поля температуры и концентрации примеси при начальной термохалинной стратификации осеннего (а, б) и зимнего (в, г) типа при ветровом воздействии длительностью 3 сут. благоприятствующем апвеллингу. Начальное поле концентрации пассивной примеси для обеих стратификаций было одинаковым

При задании более слабого северо-восточного ветра со скоростью 8 м/с траектории частиц, выпущенных в области склона, на протяжении всего периода расчетов расположены вдоль берега более компактно. При этом тенденция отклонения частиц в направлении Гданьской впадины сохраняется. Частицы из открытого моря могут попасть в шельфовую зону.

При даунвеллинговом, западном ветре  $\sim 11$  м/с значительная доля частиц, выпущенных в прибрежной области моря, оседают вблизи побережья. Частицы из склоновой области, огибая побережье, преимущественно выходят в открытое море в районе северо-восточной границы исследуемой области (рис. 4 б). При этом около половины таких частиц продолжают движение на север, а другая половина через открытое море устремляется в район Гданьской впадины. Частицы, выпущенные в открытом море, в редких случаях достигают области склона, а в прибрежные воды не попадают. При более слабом западном ветре область проникновения частиц со склона в открытое море сужается.

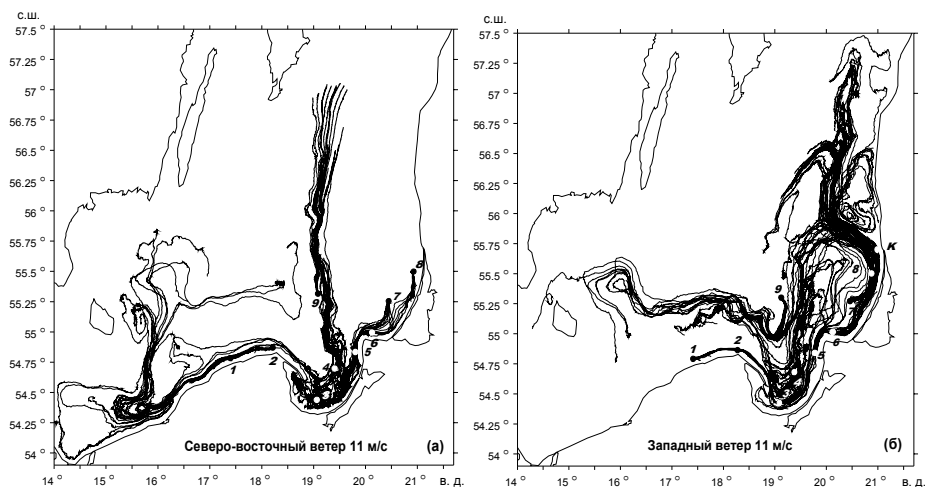


Рис. 4. Область моделирования с нанесенными траекториями частиц, выпущенных из придонных точек в прибрежной, склоновой и глубоководной зонах исследуемых районов Балтийского моря (из каждой точки выпущено 10 частиц)

Точки, где проводился запуск частиц, обозначены кругами и пронумерованы. При моделировании поля средней скорости в качестве внешнего воздействия был задан северо-восточный (а) и западный (б) ветер со скоростью 11 м/с.

Результаты моделирования распространения пассивной примеси, полученные при помощи эйлера (распространение пассивной примеси) и лагранжевого подходов, были сопоставлены. Был проведен расчет траекторий лагранжевых частиц, выпущенных из присклоновых точек, расположенных на разрезе  $\Upsilon_{an}$  на глубине 35 м на расстоянии 10 и 20 км от берега (точки запуска частиц указаны крестиками на рисунках 1 и 2 б и в). В случае запуска частиц на расстоянии 10 км от берега, на начальном этапе они распространились в сторону берега и поднялись в поверхностный слой, затем, находясь в прибрежной области



вблизи поверхности, частицы распространились в направлении квази-геострофической струи, отклонившись у юго-западного побережья Гданьского залива в сторону Гданьской впадины. В случае запуска частиц на расстоянии 20 км от берега, они не увлеклись в сторону берега к поверхности, а распространились в северном направлении, постепенно заглубляясь до придонного слоя. Описанные траектории согласуются с данными, собранными при использовании эйлерового подхода моделирования распространения пассивной примеси (рис. 2 д и е).

## Результаты и выводы

1. При помощи экспериментов со специальным заданием начального поля концентрации примеси установлены пространственные области, из которых происходит вовлечение вод из промежуточного слоя в поверхностный при апвеллинге. На расстоянии от берега большем 20 км примесь не распространяется в сторону берега и далее к поверхности. Если примесь находится на меньшем расстоянии от берега, она увлекается компенсационным течением и оказывается в приповерхностном слое.

2. При одинаковом начальном распределении поля концентрации примеси и ветровом воздействии, но различной начальной термохалинной стратификации, поле концентрации со временем меняется по-разному. Это обусловлено глубиной проникновения ветрового вертикального турбулентного перемешивания в зависимости от наличия термоклина и халоклина на определенной глубине.

3. При исследовании траекторий лагранжевых частиц, выпущенных в придонных точках прибрежного и шельфового районов Юго-Восточной Балтики, выявлено, что при северо-восточном и западном ветрах выделяются различные преобладающие направления их распространения. При северо-восточном ветре частицы распространяются через центр Гданьской впадины и далее на север; при западном ветре, приблизительно напротив Клайпеды, происходит разветвление траекторий на два потока — вдольсклоновый на север и на запад, к Гданьской впадине, а затем в Слупский желоб.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 11-05-90730-моб\_ст, № 12-05-90806-мол\_рф\_нр, № 12-05-00422-а, № 12-05-31262-мол\_а.*

## Список литературы

1. Blumberg A.F., Mellor G.L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. Washington, 1987.

2. Голенко М.Н. Исследование пространственной термохалинной и динамической структуры прибрежного апвеллинга на примере юго-восточной части Балтийского моря : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук., Калининград, 2010. С. 26.

3. Zhurbas V., Laanemets J., Vahtera E. Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. doi:10.1029/2007JC004280.





4. Журбас В. М., Ю. Элькен, Г. Вяли и др. Пути переноса взвешенных частиц в придонном слое южной Балтики в зависимости от ветровых условий (численные эксперименты) // *Океанология*. 2010. Т. 50, №6. С. 890–903.

5. Visser A. W. Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1997. Vol. 158. P. 275–281.

### Об авторах

Голенко Мария Николаевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории экспериментальных гидрофизических исследований, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

E-mail: mariya.golenko@atlantic.ocean.ru

Голенко Николай Николаевич – канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальных гидрофизических исследований, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

E-mail: nikolay.golenko@atlantic.ocean.ru

### About the authors

Dr Mariya Golenko, Research Fellow, Laboratory of Experimental Hydrophysical Studies, Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

E-mail: mariya.golenko@atlantic.ocean.ru

Dr Nikolay Golenko, Leading Research Fellow, Laboratory of Experimental Hydrophysical Studies, Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

E-mail: nikolay.golenko@atlantic.ocean.ru