

УДК 551.465.4

*АВЕРКИЕВ Александр Сергеевич, кандидат географических наук, доцент, декан океанологического факультета Российского государственного гидрометеорологического университета. Автор 78 научных публикаций, в т. ч. двух монографий (в соавт.) и трех учебных пособий*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВЫСОКОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ НАД ПОДНЯТИЕМ ДНА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЦИКЛОНА**

Зоны повышенной первичной продуктивности в море являются важным компонентом морских экосистем, ключевым звеном для формирования рыбопромысловых районов. В статье представлены основные механизмы образования и диагностика развития зон повышенной продуктивности в Баренцевом море. Наблюдения за зонами эффективно проводятся с помощью спутниковых методов и судовых наблюдений за исключением периодов облачной и штормовой погоды. Для непрерывного слежения за эволюцией зон повышенной продуктивности привлекаются методы математического моделирования процессов в море. В работе с помощью локальной гидродинамической модели воспроизведен механизм формирования продуктивной зоны над банкой Гусиной в Баренцевом море. Показано, что во время прохождения циклона над банкой происходит размывание термоклина и подъем вод с глубины, которые содержат биогенные элементы, необходимые для синтеза органического вещества.

**Ключевые слова:** *первичная продуктивность, биопродуктивные зоны, гидродинамическое моделирование, влияние циклона.*

*Биопродуктивные зоны океана.* Важной задачей при рыбопромысловых исследованиях является определение механизмов формирования и эволюции биопродуктивных зон в океанах и морях. Под биопродуктивными зонами понимают в первую очередь акватории, в которых происходит интенсивное создание первичной продукции – фитопланктона. Это необходимое начальное звено трофической цепи. Далее на таких акваториях могут формироваться скопления зоопланктона, молоди

рыб, вплоть до промысловых скоплений рыб. Показателем биопродуктивных зон является высокая концентрация хлорофилла-А (Chl-A). Необходимыми условиями образования первичной продукции – фотосинтеза – является, как известно, наличие ультрафиолета солнечного излучения, углекислого газа и биогенных веществ, прежде всего нитратов и фосфатов. Кроме того, для функционирования живых организмов требуется кислород. Далеко не все районы Мирового океана располагают этими

компонентами в достаточной мере. По этому признаку воды Мирового океана делятся на олиготрофные, мезотрофные и эвтрофные [1]. В данной работе по спутниковым снимкам и многочисленным данным наблюдений выбрана одна из зон повышенной биопродуктивности в Баренцевом море и с помощью гидродинамического моделирования выявлен механизм поступления в верхний слой моря необходимых биогенных элементов.

*Механизмы формирования зон повышенной первичной продукции в Баренцевом море.* Необходимым условием формирования первичной продукции является солнечный свет. Образование первичного органического вещества происходит, следовательно, в верхнем – фотическом – слое при наличии углекислого газа, кислорода и биогенных веществ. Поступление биогенных веществ в верхний слой и формирование зон высокой продуктивности в Баренцевом море происходит несколькими путями.

1) При зимней конвекции, достигающей в Баренцевом море значительных глубин или дна, происходит перемешивание вод по вертикали и обогащение всей толщи необходимыми биогенными веществами. Это основной и главный механизм обогащения поверхностного слоя биогенами в Баренцевом море. Весной при формировании устойчивой стратификации именно в верхнем слое за счет прогрева, таяния льда, адвективного притока теплой воды начинается интенсивное образование первичной продукции [1]. Результаты измерений и анализ физических процессов показали, что в западных районах моря интенсивное образование фитопланктона происходит весной и несколько позже в центральной и восточной частях моря, но всюду быстро завершается из-за полного потребления биогенных веществ в верхнем слое. Этим объясняется раннее и интенсивное «цветение» (вспышка, bloom) в Баренцевом море.

2) В прибрежных фронтальных зонах осуществляется локальный подъем вод и дополнительное поступление биогенных веществ. Аналогичные процессы протекают, по-видимому,

вблизи банок и островных отмелей. Как отмечено выше, интенсивное «цветение» происходит при наличии устойчивой стратификации, но над мелководной банкой может происходить разрушение термоклина и перемешивание толщи воды в течение летних месяцев, когда в более глубоководных акваториях устойчивая стратификация препятствует поступлению биогенных элементов с глубин, а «весенняя» продукция здесь уже полностью потреблена. Именно такой процесс наблюдается в районе Гусиной банки, что будет проиллюстрировано в данной работе.

3) Локальные и еще более кратковременные подъемы вод с повышенным содержанием нитратов, фосфатов и соединений кремния имеют место в вихревых образованиях различного происхождения. Важную роль в распределении температуры, солености, плотности (и, следовательно, распределении биогенных элементов, фитопланктона и других биологических объектов) играют вихри и меандры на фронтальной зоне и в ее окрестности. Анализ данных гидрофизических измерений выявил, что существуют как отдельные образования, так и пары и цепочки мезомасштабных меандров и вихревых образований, располагающиеся в зоне взаимодействия вод во фронтальной зоне. Характерные горизонтальные масштабы этих образований составляют от нескольких километров до 50–60 км. Вихревые образования наблюдаются на поверхности и прослеживаются до значительных глубин – 100–150 м, иногда достигая дна. Причем такие процессы (как и процессы вблизи мелководий и банок) происходят и в теплое время года в отличие от зимней конвекции, которая обеспечивает верхние слои биогенами только в холодные сезоны.

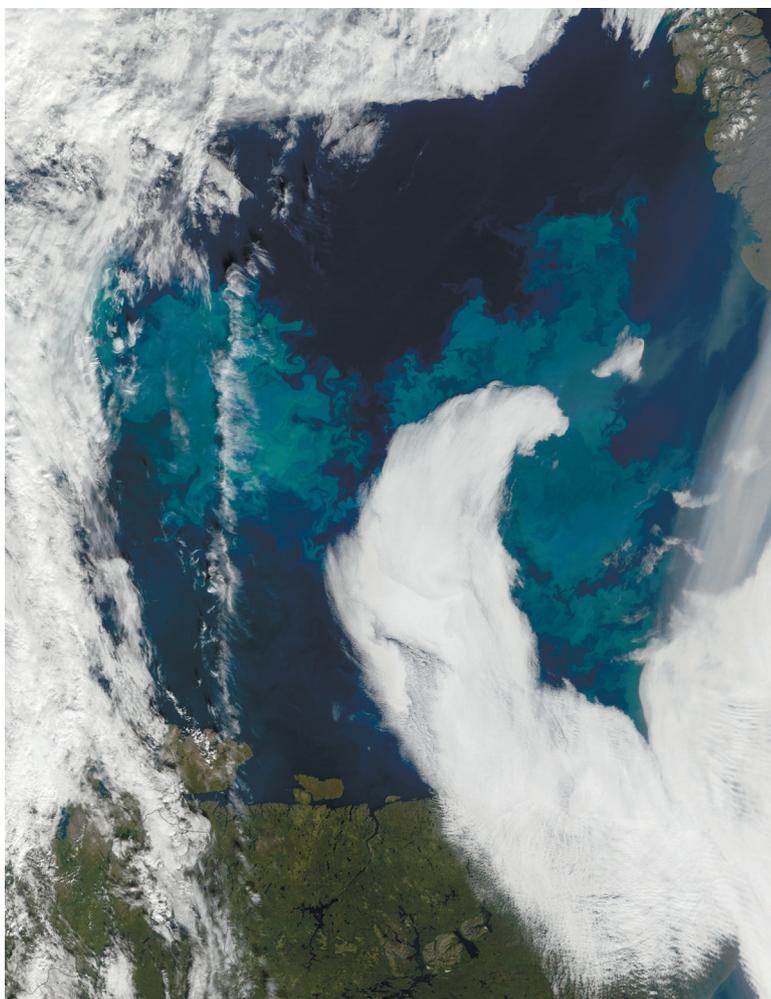
В соответствии с реализацией одного или нескольких этих механизмов располагаются зоны продуцирования первичного органического вещества. Очевидно, что зоны повышенной первичной продуктивности являются зонами с интенсивными горизонтальными и вертикальными движениями воды и зонами с повышенными градиентами физических харак-

теристик, в первую очередь температуры воды. Следовательно, они могут быть отчетливо выявлены контактными и дистанционными методами в видимом, инфракрасном диапазонах и на радиолокационных снимках.

*Положение биопродуктивных зон в летние месяцы по данным спутниковых снимков и натурных съемок.* Снимки разных лет в видимом диапазоне [2, 3] подтверждают тот факт, что значительные концентрации фитопланктона в Баренцевом море в весенние месяцы и в июне

формируются наиболее часто в теплой водной массе атлантического происхождения и в районе прибрежного фронта. Несколько позже в июле-августе, формируются скопления фитопланктона в районе банок Гусиной и Центральной и в других районах моря.

Например, в 2002 году зона повышенной концентрации хлорофилла-А (фитопланктона) преимущественно располагалась вдоль термического фронта [3] и вытягивалась в северном направлении до 72–73 с. ш. (рис. 1). Участок



**Рис. 1.** Зоны концентрации хлорофилла-А (фитопланктона) в относительно теплой атлантической водной массе в районе между банками Гусиной и Центральной на снимке 22 августа 2002 года

фронтальной зоны над банкой Гусиной образуется, по всей видимости, за счет взаимодействия вод теплых течений (Мурманского, Колгуево-Печорского, Новоземельского) и холодных баренцевоморских вод. Следует иметь в виду, что точного совпадения местоположения фронтальной зоны и очагов повышенной концентрации может не наблюдаться. Однако многочисленные снимки за разные сроки и в разные годы подтверждают, что зоны повышенной концентрации первичной продукции наблюдаются здесь достаточно часто.

Анализ спутниковых снимков акватории в инфракрасном диапазоне в летние месяцы с 2002-го по 2009 год в районе банки Гусиной также подтверждают этот факт [3, 4]. В разные

годы выраженность зон скоплений фитопланктона и концентрация хлорофилла-А в них различны, но в целом очевидно, что зоны концентрации приурочены к мелководным участкам вблизи шельфа и банок (рис. 2).

Исходя из анализа спутниковых снимков и других данных, имевшихся в нашем распоряжении, можно сделать вывод, что скопления фитопланктонных организмов постоянно наблюдаются в районе банки Гусиной в июле-августе. Наличие зоны с высоким содержанием фитопланктона («вспышки») в июле-августе 2004 года отмечено также по судовым наблюдениям (научно-исследовательское судно «Профессор Штокман») [2]. Вполне понятно и обоснованно, что в этой части Баренцева моря традиционно

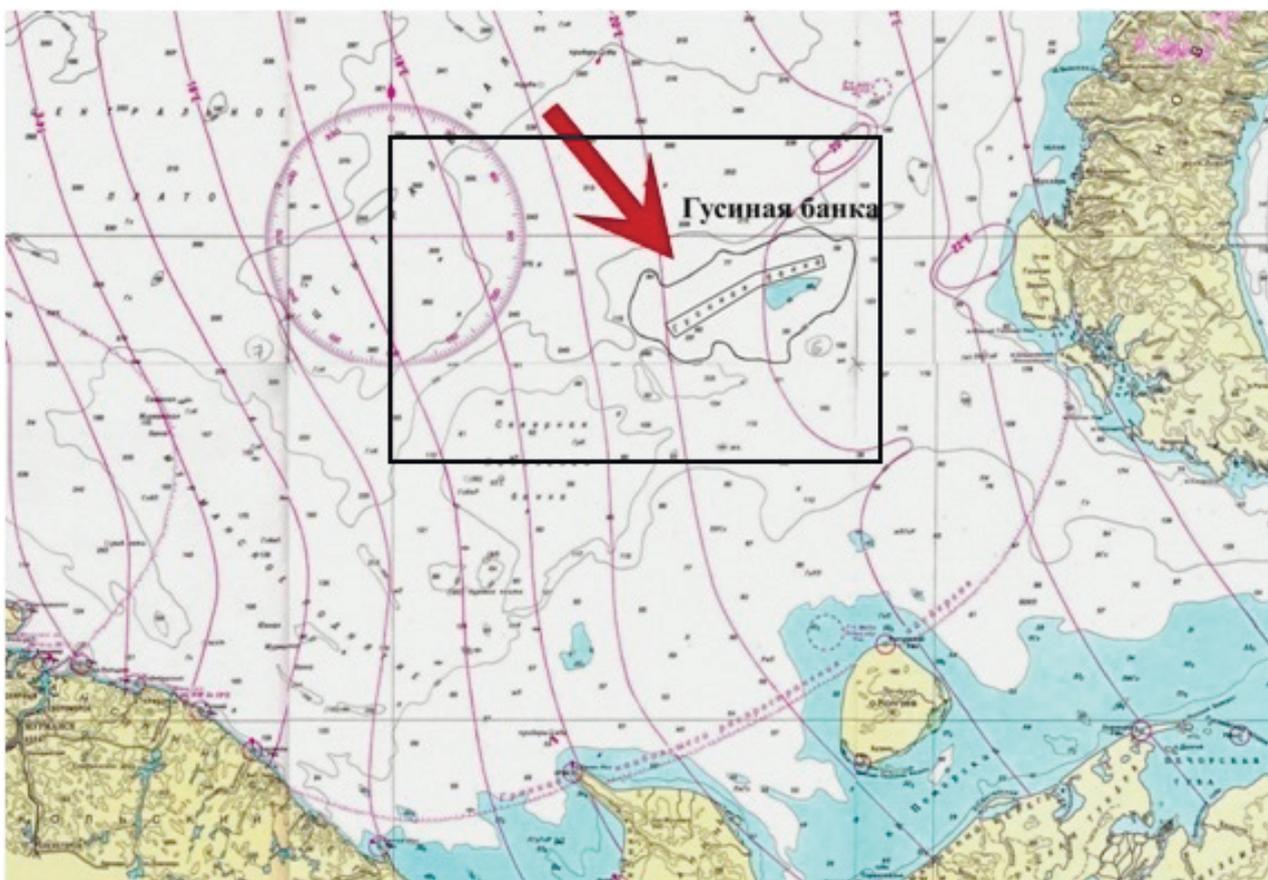


Рис. 2. Район банки Гусиной и акватория, для которой выполнялось моделирование

выделяются важные рыбопромысловые подрайоны, приуроченные к склонам банки Гусиной, такие как «Северный склон банки Гусиной» и «Западный склон банки Гусиной».

Очевидный механизм, приводящий к изменению состояния верхнего слоя моря, – атмосферное воздействие, особенно сильное в периоды прохождения активных циклонов. Процессы над шельфом и банками значительно обостряются при этом влиянии. В последние годы особое внимание уделяется мезомасштабным атмосферным вихрям и арктическим циклонам, размеры которых невелики (от 100 до 1000 км); время их жизни составляет не более 2-3 суток [5]. Как «обычные» циклоны, так и мезомасштабные вихри изменяют структуру верхнего слоя моря и усиливают процессы подъема вод над мелководьем, что приводит в т. ч. к дополнительному развитию фитопланктона после прохождения таких атмосферных образований.

Таким образом, предпосылками или причинами образования повышенной концентрации хлорофилла-А (фитопланктона) и высокой продуктивности в районе банки Гусиной (рис. 2) являются: 1. малая глубина над банкой (менее 60 м) и значительный перепад глубин на склонах (до 350 м), 2. сложные динамические условия, создаваемые взаимодействием теплых вод Мурманского, Колгуево-Печорского и Новоземельского течений и холодных баренцево-морских вод, 3. обострение процессов перемешивания при прохождении над акваторией атмосферного возмущения, например, циклона или фронта.

*Моделирование гидрологических процессов в районе банки Гусиной.* Моделирование гидрофизических процессов в выбранной области вблизи банки Гусиной требует достаточно высокой степени разрешения модели, т. к. этот район характеризуется большими градиентами температуры и солености и большими перепадами глубин между Центральной впадиной и Гусиной банкой.

Моделирование гидрологических процессов выполнено с помощью программного

комплекса «Cardinal» [1] для области, ограниченной  $70,5-73,0^\circ$  с. ш. и  $40,0^\circ - 49,0^\circ$  в. д., за период 20–30 августа 2004 года (рис. 2).

В бароклинной трехмерной модели численно решается полная система уравнений гидротермодинамики, подробно представленная, например, в [6].

На поверхности задается касательное напряжение трения ветра («квадратичный закон» трения). На дне задается касательное напряжение трения также с помощью квадратичного закона. На открытых боковых границах скорость задается как функция времени.

Тангенциальное напряжение ветра и распределение температуры и солености задавались на открытых границах в течение всего времени расчета. Температура, соленость и скорость за период 19–30 августа 2004 года на открытых границах были получены по модели «Тораз 3» [7] от L. Bertino из Центра Мона-Свердруп (г. Берген, Норвегия).

В «Cardinal» используется криволинейная система координат с переменным шагом по сетке. Площадь выбранной акватории 87 тыс. км<sup>2</sup>. Средняя глубина 189 м. Максимальная глубина 346 м. Минимальная глубина 48 м. В численной реализации в горизонтальной плоскости 4225 (65 × 65) расчетных узлов. 16 слоев по вертикали, которые сгущались ко дну и к поверхности. Средний шаг между уровенными точками 4336 м.

Полученные путем расчета поля температуры и солености демонстрируют достаточно хорошую согласованность с наблюдаемыми полями. Рассчитанная температура ниже, чем измеренная, на  $1-2^\circ$ , но расчеты были выполнены при мгновенных граничных условиях, в то время как измерения осреднены за период 20–30 августа [8].

Рассмотрим результаты моделирования гидрологических процессов в районе банки Гусиной в вертикальной плоскости на условном разрезе вдоль  $71^\circ 45'$  с. ш. В течение первых 5 суток 20–24 августа 2004 года над районом моря преобладали относительно слабые ветры восточных направлений. На всей моделируе-





мой области отчетливо выделяется термоклин на глубине от 20 до 60 м. Над банкой термоклин с перепадом температуры около  $4^{\circ}\text{C}$  выражен особенно ярко и расположен на глубине 35–40 м (рис. 3а, см. с. 10).

25–26 августа над восточной частью Баренцева моря прошел неглубокий, но интенсивный «арктический» циклон (рис. 4), в результате чего в это время над районом банки Гусиной преобладали сильные ветры ( $15\text{ м/с}$

ваит дополнительное поступление биогенных веществ в верхние слои.

Вертикальный профиль температуры демонстрирует достаточно быструю реакцию верхних слоев моря на атмосферные возмущения. Нарушенная вертикальная стратификация (по температуре и плотности воды) довольно быстро восстанавливается. Поэтому в поле фактической температуры (которое представляет собой осредненную картину за не-

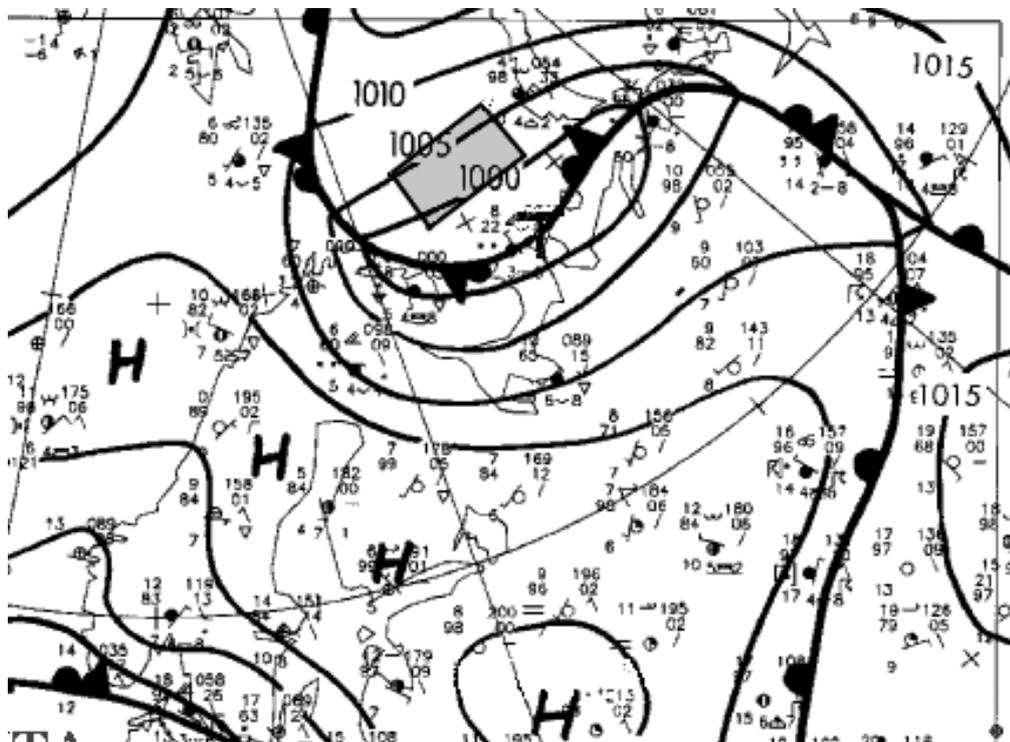


Рис. 4. Фрагмент синоптической приземной карты 25 августа 2004 года 00 GMT [7]: прямоугольником выделен район моделирования

и более) северного направления и район был полностью закрыт облачностью. Прохождение циклона привело к разрушению термоклина на банкой и подъему на поверхность холодных вод с температурой  $2,5\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$  (рис. 3б, см. с. 11). Видно, что подъем воды происходит не только с глубины 50–60 м непосредственно над банкой, но и с больших глубин на склонах, что, вероятно, обеспечи-

сколько суток в августе) пятно холодной воды на поверхности выражено гораздо слабее, чем в модели (рис. 3). Несмотря на кратковременность подобных возмущений, в поверхностные слои, по всей вероятности, успевают подняться довольно большое количество глубинных вод, богатых биогенными веществами.

### Выводы:

1. Основное поступление биогенных ве-

ществ в верхние слои Баренцева моря происходит во время зимней конвекции, которая достигает большой глубины или дна. Питательные вещества, которые поступают в верхние слои при конвекции, потребляются почти полностью уже в весенние месяцы, когда происходит интенсивное развитие («вспышка») фитопланктона, затем следует увеличение биомассы зоопланктона, развитие и питание следующих уровней трофической цепи.

2. В летнее время дополнительными источниками биогенных веществ служат локальные зоны подъема глубинных вод в прибрежных районах, на отмелях вблизи островов и на банках. В таких областях могут формироваться зоны повышенного содержания первичной продукции. В качестве примера может послужить район банки Гусиной.

3. Циклоны, проходящие над морем в летний период, способствуют процессу разрушения термоклина и подъему глубинных вод, насыщенных питательными веществами. Во время прохождения активных циклонов контактные наблюдения с борта судна затруднены

или невозможны. Также во время прохождения циклонов плотная облачность препятствует устойчивому приему данных о морской поверхности во всех диапазонах. Численное моделирование позволяет проводить исследование физических процессов и отслеживать формирование продуктивных зон в море при любых гидрометеорологических условиях, поэтому является перспективным методом для выявления продуктивных зон и прогнозирования их эволюции.

4. Проведенные численные эксперименты показали, что при прохождении над мелководным районом активного циклона, сопровождавшегося усилением ветра, произошли разрушение устойчивой стратификации над банкой и подъем вод с глубин от 50 до 300 м. Эти воды обогащены питательными веществами, которые могут служить источником дополнительного образования первичной продукции в подобных мелководных районах моря. При этом устойчивая стратификация восстанавливается достаточно быстро, т. к. в августе-сентябре в Баренцевом море продолжается прогрев верхнего слоя.

## Список литературы

1. Гершанович Д.Е., Елизаров А.А., Сапожников В.В. Биопродуктивность океана. М., 1990. 237 с.
2. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea [Текст] // Remote Sensing of the European Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Springer, 2008. P. 53–66.
3. MODIS: Earth Observing System Data and Information System. URL: <http://earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/data-products/modis> (дата обращения: 25.09.2014).
4. Козлов И.Е., Аверкиев А.С., Густоев Д.В. Наблюдение термических фронтов в районе Гусиной банки Баренцева моря на основе спутниковых радиолокационных данных // Уч. Зап. РГГМУ. 2011. № 20. С. 152–161.
5. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. Механизм образования полярных циклонов и возможность их прогнозирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. ст. М., 2011. Т. 8, № 1. С. 255–262.
6. Аверкиев А.С., Клеванный К.А. Моделирование течений в Баренцевом море в связи с освоением Штокмановского газоконденсатного месторождения // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 44–56.
7. Bertino L., Lisæter K.A. The TOPAZ Monitoring and Prediction System for the Atlantic and Arctic Oceans // J. of Operational Oceanography. 2008. Vol. 1, № 2. P. 15–18.
8. Survey Report From the Joint Norwegian-Russian Ecosystem. Survey in the Barents Sea August-October 2004. Vol. 1 // IMR/PINRO Joint Report Series. 2004. № 3.
9. Index of /de/wetter/maps. URL: <http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps> (дата обращения: 25.09.2014).

### References

1. Gershanovich D.E., Elizarov A.A., Sapozhnikov V.V. *Bioproduktivnost' okeana* [Biological Productivity of the Ocean]. M., 1990. 237 p.
2. Barale V., Gade M. Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea [Remote Sensing of the European Seas]. Springer, 2008. pp. 53–66.
3. MODIS: Earth Observing System Data and Information System. Available at: <http://earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/data-products/modis> (accessed 25 September 2014).
4. Kozlov I.E., Averkiev A.S., Gustoev D.V. Nabljudenie termicheskikh frontov v rajone Gusinoj banki Barenceva morja na osnove sputnikovykh radiolokacionnykh dannykh [Observation of Thermal Fronts Near Goose Bank in the Barents Sea Based on the Satellite Radar Data]. *RSHU*, 2011, no. 20, pp. 152–161.
5. Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. Mehanizm obrazovaniya poljarnykh ciklonov i vozmozhnost' ih prognozirovaniya [Mechanism of Formation of Polar Cyclones and the Possibility of Their Predictability]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: sb. nauch. st.* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from the Space: Coll. of Sci. Art.]. M., 2011. vol. 8, no. 1, pp. 255–262.
6. Averkiev A.S., Klevanny K.A. Modelirovanie techenij v Barencevom more v svjazi s osvoeniem Shtokmanovskogo gazokondensatnogo mestorozhdenija [Simulation of Flow in the Barents Sea in Connection with the Development of the Shtokman Gas Condensate Field]. *Meteorologija i gidrologija*, 2010 no. 11. pp. 44–56.
7. Bertino L., Lisæter K.A. The TOPAZ Monitoring and Prediction System for the Atlantic and Arctic Oceans. *J. of Operational Oceanography*, 2008, vol. 1, no. 2. pp. 15–18.
8. Survey Report From the Joint Norwegian-Russian Ecosystem. Survey in the Barents Sea August-October 2004. *IMR/PINRO Joint Report Series*, 2004, vol. 1, no. 3.
9. Index of /de/wetter/maps. Available at: <http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps> (accessed 25 September 2014).

*Averkiev Alexander Sergeevich*

Russian State Hydrometeorological University (Saint-Petersburg, Russia)

### MODELING OF THE HIGH PRIMARY PRODUCTIVITY ZONE FORMATION OVER THE BED ELEVATION IN THE BARENTS SEA DURING THE CYCLONE PASSAGE

The areas of increased primary productivity in a sea are the important component of marine ecosystems, the key link for the formation of the fishing areas. The paper presents the main mechanisms of formation of the zones of increased productivity and diagnostics of their development in the Barents Sea. Observations of zones are effectively carried out with the help of satellite techniques and ships except the periods of cloudy and stormy weather. For continuous monitoring of the evolution of the zones of increased productivity the methods of mathematical modeling of processes in the sea are used. In this paper with the help of the local hydrodynamic model the mechanism of the production zone at the Goose bank in the Barents Sea is reproduced. It is shown that during the passage of a cyclone over the bank there is a destruction of the thermocline and flood, containing plant nutrients necessary for the organic synthesis.

**Keywords:** *primary productivity, bioefficiency areas, hydrodynamic modeling, cyclone effect.*

*Контактная информация:*

*адрес:* 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский просп., д. 98;

*e-mail:* asav@rshu.ru

Рецензент – *Несветова Г.И.*, доктор географических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства» (Санкт-Петербург)