

УДК 51-7+57.502/504(268.45)

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬШОЙ МОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ БАРЕНЦЕВА И БЕЛОГО МОРЕЙ — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИРОДНЫХ РИСКОВ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

С. В. Бердников\*, В. В. Кулыгин, В. В. Сорокина,  
Л. В. Дашкевич, И. В. Шевердяев

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 14.12.2017 г.

Поступило 05.12.2017 г.

Рассмотрена интегрированная математическая модель Большой морской экосистемы (БМЭ) Баренцева и Белого морей, предлагаемая как инструмент для оценки природных рисков и эффективного использования биологических ресурсов. Модель включает следующие основные блоки (модули): а) океанографической изменчивости и биологической продуктивности; б) трофодинамики и управления промыслом; в) загрязнения среды и биоты; г) социально-экономического развития; д) оценки экологических рисков от морской деятельности. Представлены результаты применения интегрированной модели для оценки гидрологической изменчивости, многолетней динамики продуктивности экосистемы и оценки промысловой нагрузки на важнейшие промысловые объекты Баренцева моря. Предложена новая схема районирования акватории Баренцева моря, выполненная под руководством академика Г.Г. Матишова с учётом геоморфологических и гидрологических факторов. Представлена сравнительная схема распределения расчётной валовой первичной продукции по акватории Баренцева моря во второй половине XX и первом десятилетии XXI вв. Рассчитан баланс энергии в модели трофодинамики экосистемы Баренцева моря в конце XX — начале XXI в. Сделан вывод о необходимости использования экосистемных математических моделей вместо одновидовых при расчёте промысловой нагрузки на популяции. Для оценки промысловой смертности необходим учёт не только пространственных эффектов, связанных с особенностями жизненного цикла рыб и распределением промыслового воздействия, но и влияния климатических факторов и экосистемных взаимодействий. Применение современных информационных технологий как в области накопления и анализа первичных данных, так и в области их последующего обобщения для диагностики прошлых изменений даёт возможность лучшего понимания возможных последствий для БМЭ Баренцева и Белого морей существующих планов по освоению и использованию имеющихся здесь природных ресурсов с учётом опыта (иногда негативного) прошлых лет и ожидаемых климатических тенденций.

*Ключевые слова:* математическая модель, Большие морские экосистемы, Баренцево море, Белое море, первичная продукция, пищевая сеть.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524875566-572>

В 2011 г. Мурманский морской биологический институт издал монографию [1], где изложены теоретические и методологические принципы и результаты экосистемного подхода к изучению морей Российской Арктики, Берингова и южных морей России как Больших морских экосистем (БМЭ, Large Marine Ecosystem — LME). Эта работа стимулировала, с одной стороны, подготовку и издание Атласа климатических изменений в девяти БМЭ северного полушария [2], с другой — разработку математической модели БМЭ Баренцева и Белого морей как инструмента для оценки природных

рисков и эффективного использования биологических ресурсов.

Подход к изучению и управлению БМЭ опирается на пять наборов индикаторов с условными названиями: “биопродуктивность”, “рыболовство”, “загрязнение морской среды и “здоровье” экосистемы”, “социально-экономическая ситуация” и “правовой режим и организация управления” [1, 3]. В соответствии с ним рассматриваемая в статье интегрированная математическая модель БМЭ Баренцева и Белого морей включает следующие основные блоки (модули): а) океанографической изменчивости и биологической продуктивности; б) трофодинамики и управления промыслом; в) загрязнения среды и биоты; г) социально-экономического развития; д) оценки экологических рисков от морской деятельности.

Федеральный исследовательский центр  
Южный научный центр Российской Академии наук,  
Ростов-на-Дону

\*E-mail: [berdnikov@ssc-ras.ru](mailto:berdnikov@ssc-ras.ru)

В модуль океанографической изменчивости и биологической продуктивности входят:

мультикомпарментальная гидрологическая модель для расчёта водообмена между районами (рис. 1а), солёности, температуры воды и макрохарактеристик ледового режима (ледовитости и толщины льда). Районирование акватории Баренцева моря выполнено под руководством Г.Г. Матишова с учётом геоморфологических и гидрологических факторов;

согласованная с ней продукционная NPZD (нутриент—фитопланктон—зоопланктон—детрит)-модель для расчёта первичной продукции и деструкции органического вещества, биомассы фитопланктона и зоопланктона, детрита, минеральных и органических форм основных биогенных элементов (азот, фосфор, кремний), растворённого кислорода.

В модуль трофодинамики и управления промыслом входят модель трофодинамики FoodWeb [4], модель динамики численности промысловой популяции ShaReFish 2.0 [5], а также интерфейс с программным комплексом Ecorpath и Ecosim (EwE-подход) [6].

Модуль загрязнения среды и биоты включает модель нефтяных разливов для оценки загрязнения акватории и береговой зоны [7], модели переноса и накопления в Баренцевом и Белом морях радионуклидов [8].

В модуль оценки экологических рисков от морской деятельности включена усовершенствованная программа для расчёта экологической уязвимости берегов, прибрежных зон и акватории морей в результате загрязнения нефтепродуктами [9].

Ниже рассматриваются и обсуждаются результаты применения разработанных математических моделей для оценки влияния климатических флуктуаций и морехозяйственной деятельности на БМЭ Баренцева и Белого морей.

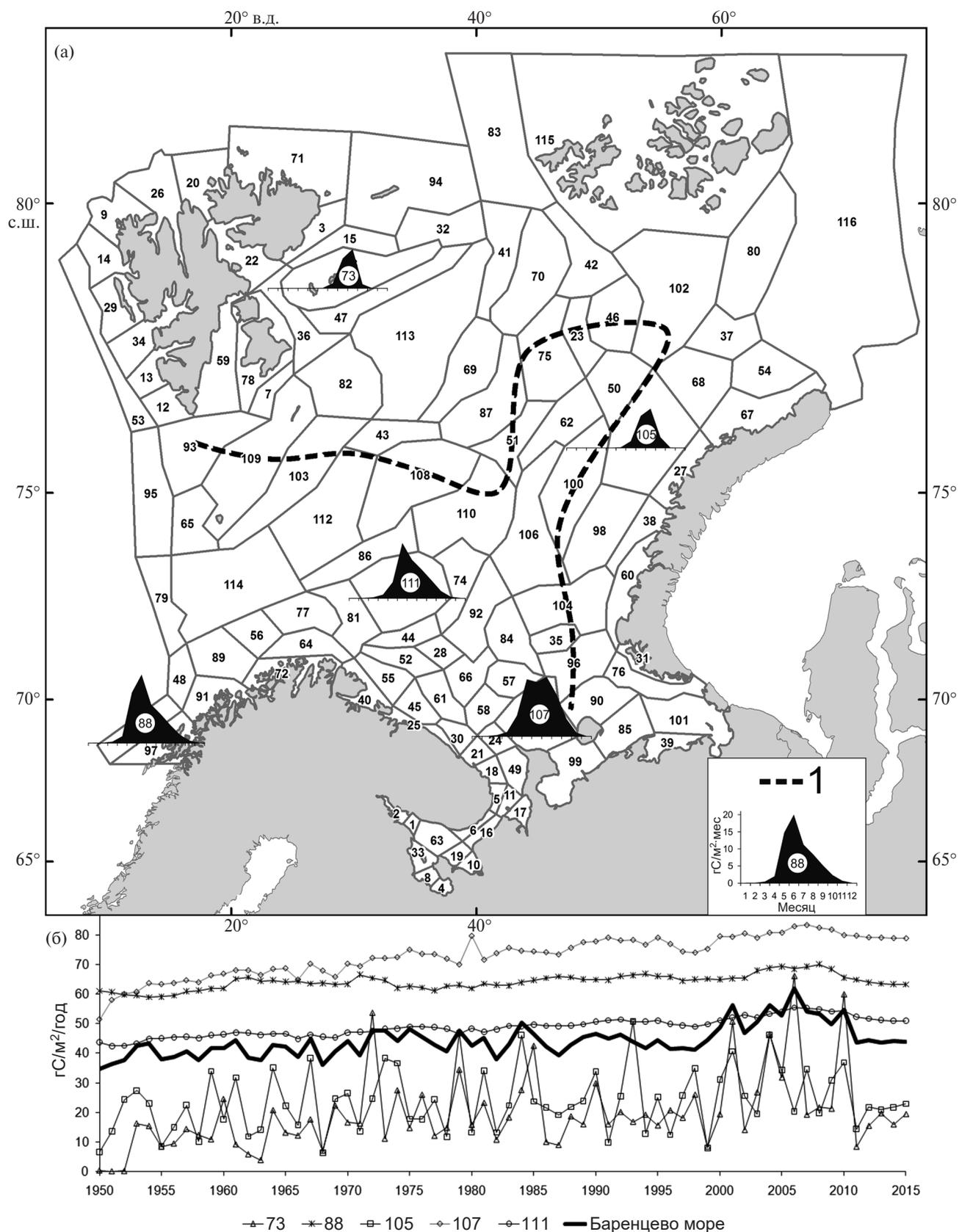
В Баренцевом море температура воды является основным показателем, характеризующим распространение тёплых атлантических вод, которые, в свою очередь, определяют ледовые условия и климат приатлантического сектора Арктики. Межгодовые колебания температуры воздуха приводят к соответствующему оклику температурных условий в различных районах Баренцева моря, но вариации среднегодовой температуры воды уменьшаются как при продвижении к районам влияния атлантических вод, так и на север, где температурные флуктуации атмосферы проявляются в изменении ледового режима.

Расчётные оценки интенсивности вертикального перемешивания вод показывают, что для районов, где кромка льда встречается чаще, скорость вертикального перемешивания больше, чем для районов, которые находятся под влиянием тёплых атлантических вод. Наличие относительно мощного пресного стока в Белом море также создаёт препятствия для вертикального обмена. Этот же эффект пониженного вертикального перемешивания отмечается в районах с интенсивным таянием льда в весенний период. Опреснение вод наряду с увеличением температуры в верхних слоях препятствует развитию процесса вертикального водного обмена. В многолетнем аспекте в аномально холодные годы отмечается усиление вертикального водообмена. Поэтому в современный период положительных аномалий температур следует ожидать уменьшения водообмена, что может препятствовать притоку биогенных элементов из глубоких слоёв и замедлить вентиляцию ложбин.

В период с 1950 по 2000 г. средняя для Баренцева моря расчётная валовая первичная продукция (ВПП) изменялась от 33 до 50 гС/м<sup>2</sup> в год при среднем значении 41,4 (рис. 1б), что согласуется с оценкой, приведённой в [10], — 44,5 гС/м<sup>2</sup> в год. Начиная с 2001 г. наблюдается повышение продукции, среднее значение за период 2001–2010 гг. — 53 гС/м<sup>2</sup> в год. Увеличение продукции связано со снижением ледовитости и повышением температурного фона в Баренцевом море в указанный период и, как следствие, активизацией продукционных процессов. Полученные результаты сопоставимы с другими оценками годовой ВПП для Баренцева моря в целом: 50–60 гС/м<sup>2</sup> в год [11], 56,0 гС/м<sup>2</sup> в год [12].

Большая вариабельность многолетней динамики расчётной годовой ВПП (рис. 1б) связана с районами кромки льда, где изменения условий среды, определяющих продуктивность, более значительны по сравнению с районами с открытой водой.

Для экосистемы Баренцева моря были выполнены оценки потоков энергии по пищевой пирамиде для периода 1990–2006 гг. (начало восстановления запасов мойвы после перелома в конце 1980-х годов) с помощью модели ЕСОРАТН [6]. Сеть была представлена 20 основными трофическими звеньями (табл. 1). Средний для рассматриваемого периода годовой вылов биологических ресурсов Баренцева моря равен 970 тыс. т (или 0,087 гС/м<sup>2</sup>). По результатам модельных оценок удаётся получить сбалансированные потоки энергии между рассматриваемыми звеньями пищевой сети при ВПП более 65 гС/м<sup>2</sup>/год.



**Рис. 1.** Схема районирования Баренцева моря (а) и динамика годовой ВПП (б). Наиболее вероятное положение кромки льда за период 1977–2011 гг.; для отдельных районов (номер указан в кружках) приведён сезонный ход ВПП (ГС/м<sup>2</sup> в мес.).

Таблица 1. Баланс энергии в модели трофодинамики экосистемы Баренцева моря в период 1990–2006 гг.

№	Название группы	TL	EE	B, гС/м <sup>2</sup>	Энергетические потоки, гС/м <sup>2</sup> /год							Доля непромысловый смертности, %
					C	R	P	G	Ca	Pd	M	
1	Птицы	3,9	0,000	0,001	0,01	0,01	0,0010	–	–	0,002	0,001	100
2	Киты	3,6	0,227	0,034	0,38	0,34	0,0007	–	0,00005	0,044	0,0006	92,6
3	Тюлени	3,9	0,003	0,016	0,23	0,20	0,0008	–	0,000005	0,026	0,0008	99,4
4	Хищный бентос	3,0	0,217	0,729	1,56	0,87	0,292	0,162	0,00227	0,516	0,128	99,2
5	Нехищный бентос	2,3	0,762	3,66	23,44	13,41	1,83	1,682	–	8,35	0,146	100
6	Донные рыбоядные	4,1	0,227	0,035	0,14	0,09	0,0189	0,000	0,00415	0,043	0,0148	78,1
7	Донные рыбы, питающиеся беспозвоночными	3,4	0,966	0,122	0,70	0,45	0,0732	0,042	0,00058	0,205	0,0309	99,2
8	Пелагические хищные рыбы	3,9	0,371	0,048	0,27	0,18	0,0298	0,000	0,00631	0,077	0,0235	78,8
9	Треска	3,5	0,865	0,138	0,92	0,63	0,110	0,023	0,0261	0,245	0,0609	76,4
10	Другие планктоноядные рыбы	3,3	0,916	0,170	0,88	0,58	0,119	0,105	0,00573	0,183	0,0078	95,2
11	Сельдь	3,2	0,839	0,374	2,00	1,38	0,224	0,200	0,0169	0,408	0,007	92,5
12	Сайка	3,2	0,975	0,030	0,22	0,15	0,030	0,026	0,00124	0,047	0,0028	95,9
13	Мойва	3,3	0,963	0,226	1,66	1,10	0,226	0,201	0,024	0,334	0,0013	89,4
14	Хищный зоопланктон	2,8	0,357	0,602	6,27	3,51	1,50	0,539	–	2,22	0,966	100
15	Эвфаузииды	2,2	0,862	0,931	26,60	13,03	5,59	4,488	–	9,08	1,10	100
16	Копеподы	2,3	0,632	0,845	32,92	15,44	7,60	4,627	–	12,8	2,98	100
17	Простейшие	2,3	0,252	0,105	11,52	4,73	4,72	3,824	–	2,97	0,90	100
18	Бактерии	2,0	0,693	0,154	32,73	8,05	18,8	17,479	–	7,20	1,31	100
19	Фитопланктон и макрофиты	1,0	0,466	0,875	–	–	64,7	53,5	–	11,2	11,2	100
20	Детрит	1,0	0,963	16,4	–	–	56,0	55,486	–	–	0,51	–
	Всего				142	64,1	162	142	0,0873	56,0	18,9	–
	На дно									0,51		
	Доля вылова к первичной продукции, %									0,13		

Примечание. TL — трофический уровень, EE — экотрофическая эффективность; B — биомасса, C — потребление, H — неусвоенная пища; A — ассимиляция; R — дыхание; P — продукция; G — выедание; Ca — вылов; M — смертность, Pd — поток в детрит.

Только часть акватории моря, находящаяся под влиянием атлантических вод, удовлетворяет этим условиям (рис. 2). На остальной акватории формируемая здесь ВПП не обеспечивает пищевую сеть экосистемы Баренцева моря достаточным количеством органического вещества. Максимальный вылов биологических ресурсов был характерен для периода 1970–1985 гг. В среднем ежегодно вылавливалось около 2 млн т промысловых рыб (максимально 3,5 млн т). Такое изъятие биологических ресурсов без “ущерба” для экосистемы возможно только при средней для моря ВПП более 100 гС/м<sup>2</sup> в год.

Недоучёт экосистемных факторов при планировании промысла и был причиной перелома таких

видов, как сельдь, мойва, треска. В структуре смертности мойвы потребление хищниками превышает 80% (табл. 1), поэтому промысел этой рыбы существенно влияет на состояние других популяций.

В рамках EwE-подхода с ростом промысловой нагрузки величина “1 — EE”, соответствующая доступному для эксплуатации популяционному резерву, стремится к нулю. Это даёт оценку критического уровня промыслового изъятия, при котором увеличивается риск неблагоприятного воздействия на популяцию других факторов. Так, согласно проведённым расчётам величина критического вылова примерно равна 300 тыс. т в год для мойвы (около 15% от промыслового запаса) и 500 тыс. т в год для трески (не более 25% от промыслового запаса).

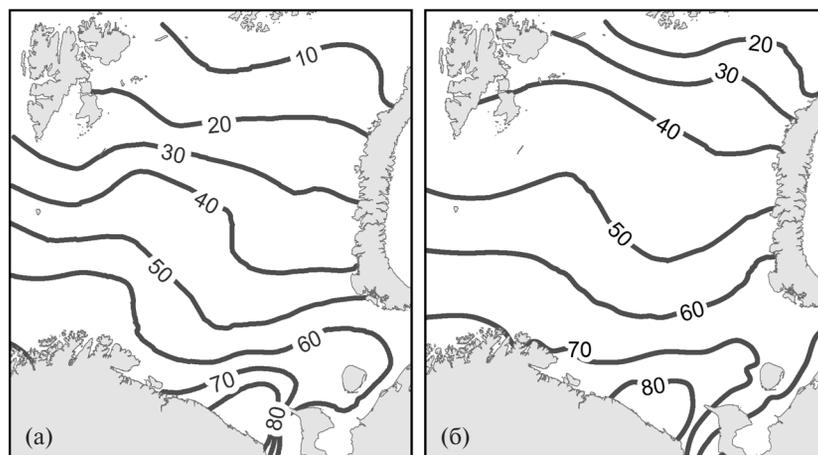


Рис. 2. Распределение расчётной ВПП ( $\text{гС}/\text{м}^2$  в год) по акватории Баренцева моря: а — 1950–2000 гг.; б — 2001–2010 гг.

Аналогичные оценки были получены ранее для упрощённой модели пищевой сети экосистемы Баренцева моря [4]. Согласованный подход к промыслу мойвы и трески позволил бы обеспечить в период 1964–1990 гг. средний вылов 1 млн т (при вариациях 0,6–1,4 млн т). Необходимо отметить, что за период активной эксплуатации мойвы средний вылов был всего на 300 тыс. т больше (при максимальном значении 3 млн т), однако в период 2004–2008 гг. на неё был введён запрет промысла. Промысловая смертность на уровне 20–25% промыслового запаса трески позволяет стабилизировать вылов на уровне 600 тыс. т в год, но дальнейший рост нагрузки способствует только уменьшению запаса и, следовательно, это может увеличить риск неблагоприятного воздействия экосистемных и климатических факторов.

Вместе с тем распространённой практикой установления величины допустимого улова (ОДУ), на основе которой распределяется квота на вылов трески между Россией и Норвегией, является использование так называемых одновидовых моделей. Однако они в 2–3 раза завышают величину допустимого изъятия по сравнению с экосистемными моделями [13].

Оценки влияния промысла и климатической изменчивости на динамику запаса и вылова трески с применением одновидовой математической модели [6] позволили выявить следующую группу ключевых факторов, влияющих на популяционные параметры и определяющих пространственно-временную динамику трески:

смена направлений нагульных миграций взрослой части популяции в зависимости от интенсивности притока атлантических вод, определяющего тепловой режим моря;

зависимость воспроизводства популяции от запасов мойвы;

повышенная смертность молоди в годы с отрицательными аномалиями температурного режима;

техническое совершенствование орудий лова (типов судов на промысле) начиная с 1982 г.

Таким образом, в одновидовых моделях динамики численности для оценки промысловой смертности необходим учёт не только пространственных эффектов, связанных с особенностями жизненного цикла рыб и распределением промыслового воздействия, но и влияния климатических факторов и экосистемных взаимодействий.

Наблюдаемое после 2001 г. потепление Баренцева моря способствовало расширению области с ВПП, превышающей  $50\text{--}60 \text{ гС}/\text{м}^2$  в год (рис. 2б). Это стимулировало рост промысловых запасов трески через увеличение кормовой базы и благоприятных условий для выживания молоди. Основанный на одновидовых моделях, хотя и с применением “предосторожного подхода” ОДУ для трески в 2013 г. был определён в 1000 тыс. т при промысловом запасе около 3,6 млн т. При этом некоторыми специалистами обосновывалось ещё большее увеличение ОДУ [14]. Но за всю документированную историю промысла трески, когда её вылов превышал 1000 тыс. т в год, каждый раз после этого он существенно снижался. Начиная с 2014 г. ОДУ вслед за промысловыми запасами трески постепенно снижается, а в 2018 г. составит не более 712 тыс. т. В 2016 г. Норвегия и Россия в очередной раз отказались от промышленного промысла мойвы, чтобы окончательно не подорвать её запасы (и кормовую базу трески соответственно).

Существующий подход к моделированию рыбных запасов в основном сосредоточен на воздействии

промысла только с точки зрения прямого удаления биомассы. Но промысел “обрезает” значительную часть экологической пирамиды, широко распространённое снижение биомассы хищных видов рыб приводит к существенным изменениям в структуре и функционировании морских сообществ. Поэтому формирование критериев допустимого изъятия биологических ресурсов на основе экосистемного подхода (и экосистемных моделей типа EwE) является более оправданным.

Решение любых задач природопользования может быть успешным только при наличии достоверной информации о состоянии природной среды [15]. Это требование распространяется на поиск, оценку и освоение любых природных ресурсов, прогнозирование, предотвращение и ликвидацию последствий опасных природных явлений, диагностику качества окружающей среды, охрану отдельных видов и биоразнообразия в целом.

Применение современных информационных технологий как в области накопления и анализа первичных данных, так и в области их последующего обобщения для диагностики прошлых изменений, даёт возможность лучшего понимания вероятных последствий для БМЭ Баренцева и Белого морей существующих планов по освоению и использованию имеющихся здесь природных ресурсов с учётом опыта (иногда негативного) прошлых лет и ожидаемых климатических тенденций.

Рассмотренная здесь “Интегрированная математическая модель БМЭ Баренцева и Белого морей” является примером такого подхода для оценки природных рисков и повышения эффективности использования биологических ресурсов морей Западной Арктики. Отдельные компоненты интегрированной модели нашли своё применение при разработке методов оценок распространения климат-индуцированных изменений в основании пищевой цепи по арктической экосистеме Баренцева моря в форме экспериментального образца программного комплекса “Климат и экосистема Баренцева моря”, разрабатываемого в рамках проекта RFMEFI61616X0073, выполняемого при финансовой поддержке Минобрнауки России по ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы”.

**Источник финансирования.** Концепция интегрированной математической модели и принципы организации согласованной работы системы моделей разработаны в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ гр. 01201363188).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексные исследования больших морских экосистем России / Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2011. 516 с.
2. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / G.G. Matishov, K. Sherman, S. Levitus. Eds. NOAA Atlas NESDIS 78. 131 p.
3. Sherman K., Sissenwine M., Christensen V., et al. // Mar. Ecol. Progress Ser. 2005. V. 300. P. 275–279.
4. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Голубев В.А. Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. В. 2. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 64–103.
5. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Лисунова Н.С., Каленченко М.М., Селютин В.В. // Рыб. хоз-во. 2010. № 6. С. 58–66.
6. Christensen V., Walters C.J., Pauly D. Ecopath with Ecosim: A User's Guide. Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver, 2005. 154 p. Available online at [www.ecopath.org](http://www.ecopath.org).
7. Бирюков П.А., Бердников С.В., Сурков Ф.А. // Геоинформатика. 2011. № 1. С. 10–16.
8. СЕЕРА — Collaboration Network on EuroArctic Environmental Radiation Protection and Research. Final Report / T. Rasilainen. Ed. Säteilyturvakeskus, Korjijvää Oy, Jyväskylä, 2014. 44 p.
9. Шавыкин А.А., Матишов Г.Г., Карнатов А.Н. // ДАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 461–464.
10. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
11. Slagstad D., Ellingsen I.H., Wassmann P. // Progress Oceanogr. 2011. V. 90. № 1. P. 117–131.
12. Макаревич П.П. // Вестн. МГТУ. 2012. Т. 15. № 4. С. 786–793.
13. Gascuel D., Guénette S., Pauly D. // ICES J. Mar. Sci. 2011. V. 68. № 7. P. 1403–1416.
14. Борисов В.М. // Рыб. хоз-во. 2012. № 4. С. 21–23.
15. Матишов Г.Г., Денисов В.В., Дженюк С.Л. // Изв. РАН. Сер. географическая. 2007. № 3. С. 27–40.

# INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL OF THE BARENTS AND WHITE SEAS LARGE MARINE ECOSYSTEM — A TOOL FOR ASSESSING NATURAL RISKS AND EFFICIENT USE OF BIOLOGICAL RESOURCES

**S. V. Berdnikov, V. V. Kulygin, V. V. Sorokina, L. V. Dashkevich, I. V. Sheverdyaev**

*Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov December 14, 2017

Received December 5, 2017

Integrated mathematical model of the Barents and White seas LME is proposed as a tool for assessing natural risks and rational use of biological resources. The model includes the following main blocks (modules): a) oceanographic conditions and biological productivity; b) trophodynamics and fishery management; c) environmental and biota pollution; d) socio-economic development; e) assessment of environmental risks from marine activities. Integrated model was used for assessing: the hydrological variability, long-term dynamics of ecosystem productivity and fishing load on the most important commercial species of the Barents Sea. A new zoning of the Barents Sea taking into account the geomorphological and hydrological factors was performed under the guidance of academician G.G. Matishov. Maps of the simulated gross primary production in the Barents Sea for the second half of the 20th and first decade of the 21st centuries are presented. The energy balance in the Barents Sea ecosystem at the end of the 20th and the beginning of the 21st century was calculated by trophodynamic model. It is concluded that determination of the fishing load on populations should base on using ecosystem mathematical models instead of single-species models. To estimate the fishing mortality, it is necessary to take into account not only the spatial effects associated with the characteristics of the fishes' life cycle and the distribution of fishing load, but also the influence of climatic factors and inner-ecosystem interactions. The use of modern information technologies, both in the field of primary data analysis, and in the area of their generalization to diagnose past changes, makes it possible to better understand the consequences for the Barents and White seas LME of existing natural resource use plans, taking into account the experience (sometimes negative) of past years and the expected climatic changes.

*Keywords:* mathematical model, large marine ecosystems, Barents Sea, White Sea, primary production, food web.