

Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря.
Материалы IX международной конференции
11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия
Петрозаводск, 2005. С. 314-317.

ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ БЕЛОГО МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

**Н.Н. ФИЛАТОВ¹, А.Ю. ТЕРЖЕВИК¹, И.А. НЕЕЛОВ², О.П. САВЧУК³, Р.Э. ЗДОРОВЕННОВ¹,
В.Н. КОВАЛЕНКО¹, А.В. ЛИТВИНЕНКО¹, Л.Е. НАЗАРОВА¹, М.П. ПЕТРОВ¹, А.В. ПЛАТОНОВ¹,
Ю.А. САЛО¹, А.Н. ТОЛСТИКОВ² Д.В. ПОЗДНЯКОВ², А.Н. ФИЛАТОВ⁴**

¹ *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск*

² *Международный нансеновский центр окружающей среды и дистанционных методов, С. Петербург*

³ *Отдел системной экологии, Стокгольмский университет, Стокгольм, Швеция*

⁴ *Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, С. Петербург*

В статье рассматривается современное состояние моря и его водосбора с применением современных средств изучения, таких как дистанционные и моделирование в сочетании с наблюдательными экспериментами. Изучены социально-экономические особенности региона. Разработан комплекс моделей и ГИС-система, в которых интегрированы данные измерений с судов, спутников и наземных станций. На основе этих сведений с помощью математических моделей оценены особенности изменения экосистемы моря при разных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности.

N.N. Filatov, A.Ju. Terzhevik, I.A. Neelov, O.P. Savchuk, R.E. Zdorovenov, V.N. Kovalenko, A.V. Litvinenko, L.E. Nazarova, M.P. Petrov, A.V. Platonov, Yu.A. Salo, A.N. Tolstikov, D.V. Pozdnyakov & A.N. Filatov. Changes in the ecosystem of the White Sea influenced by climatic and anthropogenic factors // The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea. Proceedings of the IXth International Conference, October, 11-14, 2004. Petrozavodsk, Karelia, Russia. Petrozavodsk, 2005. P. 314-317.

The current state of the White Sea ecosystem and its catchment area is considered by means of remote sensing and numerical modeling together with direct observations. Socio-economical aspects of the region are also studied. Several numerical models of the sea hydrodynamics and ecosystem and the geographical information system (GIS) that is based on the knowledge collected are developed. With the numerical models a detailed analysis of the changes in the sea ecosystem under different scenarios of regional climate and economic changes are performed.

В последние годы Белое море привлекает значительное внимание. Связано это с новым этапом освоения ресурсов как самого моря, так и его водосбора. Отметим предполагаемую добычу алмазов, золота, богатых рыбных ресурсов, марикультуры, транспортировку природного газа со Штокмановского месторождения Баренцева моря в Западную Европу. Все это требует разработки научных основ рационального использования и охраны моря. Однако в последние годы существенно снизился объем экспериментальных исследований, ухудшилась координация работ. Для оценки состояния моря и его водосбора, в этом случае, все большее внимание должно уделяться внедрению новых современных средств изучения, таких как дистанционные и моделирование в сочетании с наблюдательными экспериментами. Для достижения этой цели выполнена разработка комплекса моделей и ГИС-системы, в которых интегрированы данные непосредственных измерений на акватории и водосборе, дистанционные спутниковые данные, а также сведения о социальном и экономическом развитии региона Белого моря. Как показали работы по программе ФЦП «Мировой океан», по разделу «Белое море», основ-

ные проблемы связаны с пониманием функционирования экосистемы моря и ее изменений, обусловленных недостатком знания особенностей продуктивности моря и ее изменений в зависимости от комплекса условий, и отсутствием соответствующих моделей. Исследования последних лет хотя и выполняются значительным количеством организаций (ЗИН, ИОРАН, ИВПС КарНЦ РАН, СевПиНРО, МГУ, СПбГУ, ВНИРО и др.), но проводятся они, как правило, не синхронно по всей акватории моря и не являются комплексными. Многие данные не доступны для широкого круга пользователей. Необходимо изучение изменчивости функционирования экосистемы Белого моря под влиянием антропогенного воздействия. В этой ситуации особое значение приобретает внедрение новых методов и средств.

Именно этому комплексу указанных выше вопросов и посвящены исследования ИВПС, проводимые совместно с рядом других организаций по проекту ИНКО-Копенгаген ICA «Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White Sea», №ICA2-1999-10167 (координатор проф. О. Иоханнесен).

Результаты

Для определения нагрузки на водосбор и море выполнен широкий комплекс исследований, включающий оценку социально-экономических проблем на водосборе и разработку сценариев развития региона, с внедрением разнообразных индексов для использования их в моделях и геоинформационных системах.

Кроме показателей, учитывающих антропогенные факторы, необходимо оценить изменчивость и изменения климата, которые могут повлиять на водосбор. Для решения этих проблем внедряются современные Модели Глобального Климата (МГК) и выполняется вероятностный анализ репрезентативных длительных наблюдений.

Полученные закономерности, сценарии должны быть учтены при определении стратегии развития региона. Основными для данного исследования являются следующие задачи:

- сравнение данных, полученных непосредственно при измерении на гидрометеорологических станциях, расположенных в районе исследований, с модельными данными на модели ЕСНАМ-4, полученными в Институте метеорологии Макса Планка (Bengtsson, 1997) по совместному проекту INTAS, за период 1960-2001 гг.;

- оценка на этой основе возможных изменений элементов климата и водного баланса в изучаемом регионе за период 2000-2050 гг. по двум сценариям возможного изменения содержания CO_2 , и увеличения сульфатных аэрозолей техногенного происхождения в атмосфере Земли.

Возможные сценарии изменения климата и водного баланса территории на период 2000-2050 гг.

Оценка климатических изменений для Карелии и Кольского полуострова была выполнена с использованием модели ЕСНАМ-4 по сценариям G и GA. Рассчитывались основные статистические характеристики (нормы, максимум и минимум температуры воздуха и осадков, линейные тренды), которые сравнивались с аналогичными характеристиками современного климата. Анализ этих данных показывает, что общая тенденция увеличения годовых температур воздуха и осадков будет сохраняться при новых климатических условиях. В соответствии с результатами моделирования на модели ЕСНАМ-4 в изучаемом районе возможны заметные изменения климатического и гидрологического режима. Для Кольского полуострова по обоим сценариям норма годовой температуры воздуха может увеличиться от $-0,7$ до 2°C , годовые суммы осадков в средних многолетних значениях возрастут от 461 мм до 482-486 мм. Аналогичные изменения возможны и в Карелии: рост годовой температуры воздуха от $1,6$ до $2,7-3,0^\circ\text{C}$, увеличение годовых сумм осадков от 582 до 610-635 мм, при этом суммарное испарение может возрасти от 264 до 323-348 мм. Суммарный речной сток с территории Карелии при новых кли-

матических условиях может уменьшиться с 319 в современном климате до 280-290 мм к 2050 г. Это может быть вызвано уменьшением разницы между количеством осадков и общим испарением, увеличение которого будет более значительным, чем увеличение осадков. Согласно модельным данным, возможны значительные изменения в распределении среднемесячных температур воздуха: в Карелии месяцы с мая по октябрь станут более теплыми, чем в настоящее время, на Кольском полуострове все месяцы будут значительно теплее. Изменения климатического и водного режима, в этом случае, требуют изменения в управлении водохозяйственными системами и отраслями экономики, базирующимися на использовании водных ресурсов (гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и др.).

Гидрология моря и изменения климата

В работе ИВПС особое внимание уделяется проведению целенаправленных экспериментов по изучению гидрометеорологических процессов и явления разного масштаба, вероятностному анализу длительных наблюдений и внедрению новых технологий, таких как дистанционные методы и ГИС. Были оценены многолетние тенденции важнейших гидрофизических характеристик температуры воды и солености в Белом море. По данным наблюдений на 5 основных гидрометеорологических постах, расположенных в основных районах Белого моря выявлены сезонные колебания и линейный тренд температуры воды и солености моря. Причем эти изменения за последние 10 лет совпадают с таковыми для Балтийского моря, что было показано за более ранний период в работе Смирновой, Терзиева и др. (2001). В тоже время, колебания и изменения температуры воды в Баренцевом и Белом морях хорошо согласуются, а между температурой воды Белого моря и местными метеорологическими характеристиками существуют временные различия. По-видимому, изменчивость гидрологических характеристик Белого моря связаны в большей степени с таковыми в Баренцевом море и в значительной мере определяются глобальными, а не региональными климатическими изменениями.

Особенности гидродинамики моря

Модель для широкого диапазона масштабов, которую можно совместить с моделью экосистемы, была разработана в СПб. Отделении ИО РАН и Нансеновском центре (Неелов, Умнов, 1997). Калибровка и верификация модели выполнялась по архивным и данным измерений, собранных в специальных направленных экспериментах ИВПС. Несмотря на сравнительно длительную историю изучения Белого моря, до сих пор недостаточно изученной остается мезомасштабная и синоптическая изменчивость термогидродинамических полей в особенности в эстуариях и заливах. Мезомасштаб-

ные процессы доминируют в формировании внутреннего и внешнего водообмена моря, определяют особенности распределения химико-биологических характеристик акваторий и функционирования его экосистемы. Именно они вносят наибольший вклад в перераспределение взвешенного вещества, загрязнений и других гидрохимических элементов между прибрежными и открытыми частями моря. Для исследования этих процессов и явлений были проведены целенаправленные подспутниковые эксперименты и использованы данные со спутников серии НОАА, SeaWifs. Был создан архив данных со спутника НОАА за последние 20 лет. Наибольший интерес представляет использование для изучения пространственных неоднородностей в динамике спутниковых снимков, полученных путем последовательных съемок. Для изучения полей температуры воды в Онежском заливе Белого моря были проведены синхронные съемки STD зондами измерения температуры поверхности воды (ТПВ), солёности и др. параметров, а также ИК-радиометром с борта судна. Использование такого набора данных позволяет провести атмосферную коррекцию, оценить влияние погодных условий на измерения ТПВ, выяснить влияние холодной пленки (skin-effect) на поверхность моря на показания измерителей. Рассматривались проблемы калибровки спутниковых данных, оптимизации алгоритма вычисления температуры, определение критерия правильности вычисленной ТПВ.

Анализ позволил выявить наличие струйных течений многочисленных вихревых образований циклонического и антициклонического характера, когерентных структур типа «грибовидные образования», а также неоднородностей, связанных с генерацией экмановских прибрежных апвеллингов. Показано, что в центрах мезомасштабных вихревых образований, антициклонов обычно наблюдаются нисходящие движения вод (опускание изолиний гидрофизических параметров), что никак не способствует развитию там фитопланктона. Это явление (опускание вод в центрах следующих друг за друг вихрей было описано как «биогеохимический барьер» на границе шельфовых вод (Сапожников, 1991; Шевченко и др., 2001; Скибинский, 2001). Считается, что образующаяся таким образом зона конвергенции частично изолирует глубокую центральную часть моря от влияния прибрежья. Это позволяет предположить, что вовлечение богатых биогенами и фитопланктоном прибрежных вод играет большую роль в формировании пятен повышенной концентрации фитопигментов в антициклонах, чем особенности вертикального движения вод в поверхностном слое этих вихрей.

Оценка концентрации хлорофилла а, минеральной взвеси, РОВ, продуктивности моря дистанционными методами

Особый интерес представляет сравнительный анализ наблюдений с НИС, спутников серии НОАА и SeaWifs для изучения пространственных особенностей хлорофилла а оценки продуктивности моря. В распределении концентрации хлорофилла а наблюдается существенная неоднородность. Нет прямой корреляции в распределении величин концентрации хлорофилла а и температуры воды в поверхностном слое моря и необходимо рассматривать одновременно особенности циркуляции вод, вертикальной плотностной структуры и распределения биогенов. В то же время проникновение рассеянных поверхностных вод сказывается на повышении устойчивости водной толщи выше постоянного термо-галоклина, что приводит к необычно раннему развитию фитопланктона и, следовательно, к повышению концентрации хлорофилла в поверхностном слое. Синхронные данные со спутников НОАА, SeaWifs, а также подспутниковые измерения с НИС «Эколог» дали возможность получить алгоритмы расчета ТПВ и концентрации хлорофилла а, подойти к вопросу взаимодействия термогидродинамических и биологических полей. Для оценок концентрации хлорофилла а использовались алгоритмы SeaDAS и Levenberg-Marquardt. Наиболее приемлемым для условий Белого моря оказался алгоритм Левенберга-Маргарта.

Моделирование экосистемы и разработка ГИС для решения задач принятия решений

Совместно с рядом организаций по проектам указанным далее, а также с коллегами из ИО РАН (Леонов, 2001), Финляндии (Кайтала, 2001), Международным Нансеновским центром разрабатываются модели эвтрофирования, в которых учтены сценарии изменений климата, социально-экономического развития региона, разнообразных антропогенных воздействий, на базе собранной информации и создаваемых геоинформационных систем.

Разработан комплекс термогидродинамических и экосистемных, имитационных моделей для оценки современного состояния и прогноза изменений моря. При этом на определенных этапах работы выполнено:

- собрана информация, необходимая для настройки, верификации термогидродинамических и имитационных моделей БМ,
- уточнены алгоритмы оценки первичной продукции по данным дистанционных измерений,
- выполнены работы по использованию данных дистанционного зондирования в задачах моделирования,
- сформулированы сценарии для оценки возможных изменений в экосистеме БМ как отклик на колебания внешних воздействий и использованы в решении практических задач.

На основе этого выполнены оценки изменений экосистемы моря при разном комплексе условий.

В рамках исследуемой модели, разработанной И.А. Нееловым и О.П. Савчуком установлено, что:

- изменение концентрации биогенных элементов в речном стоке не приводит к существенным изменениям экосистемы Белого моря. Лимитирующим элементом в данной системе является неорганический фосфор,

- уменьшение речного стока на 20% и увеличение среднегодовой температуры на 2 градуса приводит к уменьшению средней толщины льда зимой на 10 см, увеличению средней солености моря на 1 промилле дает возрастание верхнего квазиоднородного слоя моря и приводит к обострению летнего термоклина. Это в свою очередь ослабляет вертикальный водообмен, что приводит к дефициту биогенов в поверхностных водах и ослаблению осеннего цветения фитопланктона.

Предварительные расчеты на достаточно простой модели показывают незначительные изменения экосистемы Белого моря при заданных условиях потепления.

Литература

Леонов А.В. 2001. Анализ динамики концентраций органических веществ и скоростей продукционно-деструкционных процессов в водах северной части Каспийского моря. *Океанология*. Т. 40. № 1. С. 37-51.

Неелов И.А., Умнов А.А. 1997. Модель экосистемы Невской губы. Сб. «Невская губа - опыт моделирования». Под ред. В.В.Меншуткина. С.-Петербург. СС. 183-217.

С.Кайтала и др. 2001. (Kaitala S., Shavykin A., Volkov V.A.). Environmental GIS database for the White Sea. Proceedings of the *Open source GIS - GRASS users conference 2002*. Trento, Italy. 7 pp.

Сапожников В.В. 1991. Биогидрохимический барьер на границе шельфовых вод Черного моря // *Океанология*. Т. 31. № 4. С. 577-584.

Скибинский Л.Е. 2001. Роль геохимических барьеров в переносе и накоплении загрязняющих веществ в устьевых и прибрежных Биотопах белого моря. 2000, Тезисы докладов 8-я региональная научно-практическая конференция «проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Беломорск. 2000 г. С. 51-53.

Смирнова А.И., Терзиев Ф.С., Яковлева Н.П., Арсенчук М.О. 2001. Закономерности разномасштабной изменчивости элементов гидрометеорологического режима белого моря, фоновые оценки их колебаний на современном этапе // *Материалы VIII регион. науч.практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря»*. Беломорск. С. 22-29.

Шевченко В.П., Политова Н.В., Айбулатов Н.А. и др., 2001; Количественное распределение и состав взвеси в прибрежной зоне Печорского моря // *Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке*. М.: ГЕОС, 2001. С. 239-250.

Bengtsson, L. 1997. Numerical modeling of the Earth's Climate. - Publ. Max-Planck Inst. for Meteorology, Hamburg: 94 pp.