

## Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора

Н. Н. Филатов<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН,

А. В. Толстиков<sup>2</sup>, кандидат географических наук,

М. С. Богданова<sup>3</sup>, А. В. Литвиненко<sup>4</sup>

ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В. В. Меншуткин<sup>5</sup>, доктор биологических наук

ФГБУН Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

*Представлен обзор результатов собственных разработок авторов баз данных и знаний, электронного атласа, геоинформационных и экспертных систем, обеспечивающих процессы формирования, ведения и представления данных по наличию и использованию ресурсов на примере Белого моря и его водосбора (Беломорья). Опыт создания подобных информационных систем может быть полезен для других регионов Арктической зоны Российской Федерации, решения современных и перспективных задач освоения и охраны ресурсов Арктики.*

**Ключевые слова:** атлас, базы данных, ГИС-технологии, моделирование, прогноз, природные ресурсы.

### Введение

Весной 2014 г. на заседании Совета безопасности России рассматривались вопросы реализации программ промышленного, социально-экономического, инфраструктурного возрождения Арктической зоны Российской Федерации, отмечался недостаток информации о ресурсах Арктической зоны в виде геоинформационных систем (ГИС), атласов и справочников. При этом за рубежом созданы ГИС, атласы, справочники с использованием информации по российской Арктике [24; 52]. Важной задачей является также развитие транспортной инфраструктуры Арктической зоны — хордовых веток к Северному морскому пути и портам на берегу Северного Ледовитого океана. Повышается роль созданных ранее систем, например, Беломорско-Балтийского канала,

в связи с активизацией освоения ресурсов Арктики [26; 38; 45]. Для Белого моря, через водосбор которого проходит трасса канала, имеется опыт разработки комплексных геоинформационных систем [10—14; 53], создается электронный атлас, который можно использовать в качестве прототипа для других регионов Арктической зоны. Беломорье можно рассматривать как модель Арктики для калибровки и верификации разрабатываемых информационных систем, атласов, математических моделей, для оценки изменений и прогноза влияния климатических изменений на экосистемы при разработке моделей эколого-социальноэкономических систем, а также систем поддержки принятия управленческих решений. Актуальной задачей для Арктической зоны Российской Федерации является оценка ресурсов, изменений экосистем при активизации хозяйственной деятельности и климатических изменениях [37; 42; 43; 54; 56].

Однако реальную изученность Белого моря и его водосбора нельзя признать равномерной и полной. Как отмечается в [19], «существуют значительные

<sup>1</sup> e-mail: nfilatov@rambler.ru.

<sup>2</sup> e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

<sup>3</sup> e-mail: mari-mb@mail.ru.

<sup>4</sup> e-mail: aleks-litvinenko@mail.ru.

<sup>5</sup> e-mail: volodja@emi.nw.ru.

пробелы в пространственно-временном покрытии объектов исследования». Для этого региона актуально развитие систем раннего обнаружения и прогнозирования опасных и чрезвычайных ситуаций, способных привести к значительным негативным социально-экономическим и экологическим последствиям на водосборе и море.

### **Разработка тематических атласов Белого моря**

Важным средством, используемым для решения разнообразных практических задач и принятия управленческих решений, являются комплексные атласы. Для Беломорья и ряда других районов Арктической зоны разработано более 10 тематических атласов и справочных изданий, в которых представлены определенные сведения о ресурсах региона, однако обобщающих продуктов в виде ГИС, комплексных атласов, в особенности электронных, которые могут оперативно обновляться, в настоящее время нет. В связи с этим Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) была поставлена задача создания нового комплексного электронного атласа Белого моря и водосбора.

Для Белого моря и его водосбора, а также для других регионов Арктической зоны, в которых имелись сведения о Белом море, в разное время было создано несколько тематических атласов и информационно-справочных систем [2—9; 15; 21; 24; 45; 48; 52]. Дадим их краткую характеристику.

«**Атлас Белого моря с прилежащими заливами Онежским и Кандалакшским**» [5] подготовил генерал-лейтенант Л. И. Голенищев-Кутузов. Этот первый атлас Белого моря долгое время считался одним из лучших морских картографических изданий России.

«**Атлас Белого моря**» [4] составлен Гидрографическим депо Главного морского штаба под руководством капитан-лейтенанта М. Ф. Рейнеке.

«**Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря: Аннотированный атлас**» [2]. Это издание содержит обширную информацию по океанографическому режиму Белого моря, представленную на 101 карте. Атлас был создан по результатам проекта ГКНТ СССР «Белое море» Зоологического института РАН (ЗИН РАН) и Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича (ПИНРО) при участии Института океанологии АН СССР, Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Северного филиала ПИНРО, Иhtiологической комиссии. Всего в сборе информации участвовало более 30 организаций.

«**Биологический атлас морей Арктики: планктон Баренцева и Карского морей**» [15] создан совместно Мурманским морским биологическим институтом Кольского научного центра РАН (ММБИ

КНЦ РАН) и Системой мировых центров данных Международного совета научных союзов (WDC) в рамках проекта GODAR (глобальное спасение и архивация океанографических данных), поддерживаемого Межгосударственной океанографической комиссией ЮНЕСКО. Атлас представлен на компакт-диске и распространяется через Интернет. В него вошли сведения и по Белому морю.

«**Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария**» [3] создан ММБИ КНЦ РАН совместно с Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA), Южным научным центром РАН и НПК «Моринфо».

«**Информационная система Белого моря**» [25; 36; 40], разработанная по проекту INKO-Copernicus — ICA2-CT-2000-10014, «Sustainable Management of the Marine Ecosystem and Living Resources of the White Sea (WHITESEA)» ИВПС КарНЦ РАН, ММБИ КНЦ РАН, Nansen Environmental and Remote Sensing Centre (Норвегия), Finnish Institute of Marine Research (Финляндия), Нансеновским международным центром дистанционных методов и окружающей среды, а также Санкт-Петербургским научно-исследовательским центром экологической безопасности РАН. Атлас содержит обобщающую информацию по социэкономике и природным ресурсам на водосборе. Он создан средствами ГИС с использованием электронных карт в формате HTML и представлен на сайте ИВПС КарНЦ РАН и на компакт-диске.

**Электронный атлас «Белое море. Мыс Картеш»** [50] подготовлен коллективом Беломорской биологической станции ЗИН РАН и World Data Center for Oceanography, Silver Spring, Ocean Climate Laboratory (I. Smolyar, R. Tatusko, S. Levitus). Атлас доступен в Интернете: [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH\\_SEA/WWW/HTML/atlas.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html).

«**Иллюстрированный атлас беспозвоночных Белого моря**» [21] содержит морфометрическую информацию по Белому морю, иллюстрированную информацию об обитателях Белого моря, цветные фотографии и описания более 160 видов мелководных беспозвоночных.

**Информационно-справочная система «Белое море»** [14] разработана ИВПС КарНЦ РАН совместно с Институтом прикладных математических исследований КарНЦ РАН. Проекты хранятся на сервере ИВПС КарНЦ РАН и высылаются клиентам по требованию.

**Комплексная база данных «Белое море и его водосбор»** [10], представляющая собой обновленные и дополненные новыми сведениями разработанные ранее базы данных, представленные выше. Эта база данных Института водных проблем Севера КарНЦ РАН получила государственную регистрацию (№ 2010620435).

**Иллюстрированный атлас «Флора и фауна Белого моря»** под редакцией Н. Н. Марфенина [48] дает представление об особенностях морфологии,

биологии, экологии, поведении каждого вида, местах обитания, а также об отличиях похожих видов.

«Атлас-определитель макрофитов Белого моря» под редакцией М. М. Болдумана [9] содержит краткое описание и изображения около 120 видов беломорских макрофитов из 68 родов.

«Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики» [6] подготовлен специалистами ряда ведущих научных учреждений РАН, высшей школы, Министерства природных ресурсов и экологии и Росрыболовства. В нем содержатся сведения о мейофауне, макрозообентосе, видовом разнообразии рыб, рыбообразных и морских птиц, динамике ледяного покрова, морфогенетическим особенностям берегов, динамике растительности болот, об особо охраняемых природных территориях и некоторые другие данные, в том числе по Белому морю. Работа анонсируется как основа для планирования природоохранной деятельности в морях и на побережьях российской Арктики в условиях меняющегося климата и интенсификации хозяйственного освоения. В атласе представлены материалы по федеральным и региональным особо охраняемым природным территориям в береговой зоне арктических морей, физико-географическому и биогеографическому районированию, а также по видовому разнообразию групп биоты, по биотопам и элементам биологического разнообразия.

Электронный атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана» [24] входит в Единую систему информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) ([http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1\\_1.html](http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1_1.html)). Это режимно-справочное пособие, содержащее сведения о климатических характеристиках морской среды морей Арктики. Атлас подготовлен на основе исходных отечественных и зарубежных данных гидрометеорологических наблюдений, накопленных в Госфонде ГУ «ВНИИГМИ-МЦД» за многие годы, а также материалов, полученных в рамках проектов 4-го направления ЕСИМО федеральной целевой программы «Мировой океан». Атлас имеется на серии лазерных дисков, включающих результаты климатической обработки данных и программное приложение для работы с данными. Он создан в виде настольного приложения для работы в среде ГИС «ArcView» и дополнен HTML-вариантом, ориентированным на стандартный интернет-браузер. Атлас подготовлен в Лаборатории исследования морей Центра океанографических данных ГУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Атлас «Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения» [10] создан по гранту Русского географического общества Географическим факультетом МГУ. Атлас содержит цикл оригинальных, обновленных или адаптированных тематических карт и пояснительные записки. Многие картографические обобщения основаны на ранее недоступных архивных материалах, синтезе разнообразных знаний о природе, населении

и хозяйстве арктического региона России. Издание представляет интерес для населения региона, студентов, органов власти, бизнеса, спасателей.

При создании нового электронного атласа «Белое море и водосбор» авторы исходят из того, что основное его отличие от ранее изданных состоит в том, что в нем будет представлена оперативно обновляемая комплексная эколого-социальноэкономическая информация о море и его водосборе. Основная цель нового электронного атласа — многоцелевое, широкое и разнообразное его использование при принятии управленческих решений, проектировании, разработке научных рекомендаций рационального природопользования, управления и охраны ресурсами моря и его водосбора, часть которого входит в Арктическую зону. При создании атласа в первую очередь будут использоваться собственные данные, разработанные ранее ИВПС КарНЦ РАН информационно-справочные системы, ГИС, а также сведения, опубликованные коллегами в атласах и обобщающих монографиях [10; 14; 17; 34; 35]. В атлас войдут сведения об океанографических характеристиках моря включая сведения по гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, геологии моря. Будут также даны электронные ссылки на другие атласы и информационные системы, представленные в Интернете, например, ЕСИМО.

В разрабатываемом ИВПС КарНЦ РАН атласе будут представлены обновляемые базы данных, созданные средствами ГИС, включающие многолетние гидрометеорологические наблюдения, полученные на сети Росгидромета на Белом море и водосборе. Будут приведены данные по состоянию водосбора: географические особенности, ландшафты, леса, болота, озера, реки, источники антропогенного воздействия [32] и др. В атлас войдут карты-схемы течений, температуры воды, солёности для разных комплексов гидрометеорологических условий, полученные не только по данным измерений, но и по результатам расчетов на современных трехмерных математических моделях, разработанных в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте [14] и Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) [51]. Модель Северного Ледовитого океана ИВМ РАН была адаптирована сотрудниками Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН (ИПМИ КарНЦ РАН) и ИВПС КарНЦ РАН для Белого моря [49]. Будут даны прогностические оценки изменения экосистемы моря и экосистем водосбора, полученные по результатам расчетов на математических моделях, оценки параметров качества воды по данным дистанционных измерений для разных лет, сезонов, комплекса гидрометеорологических условий. Разрабатываемый многоцелевой электронный атлас найдет применение в задачах рационального использования ресурсов моря и водосбора, прогноза состояния моря при разнообразных природных климатических и антропогенных сценариях, а также при возможных

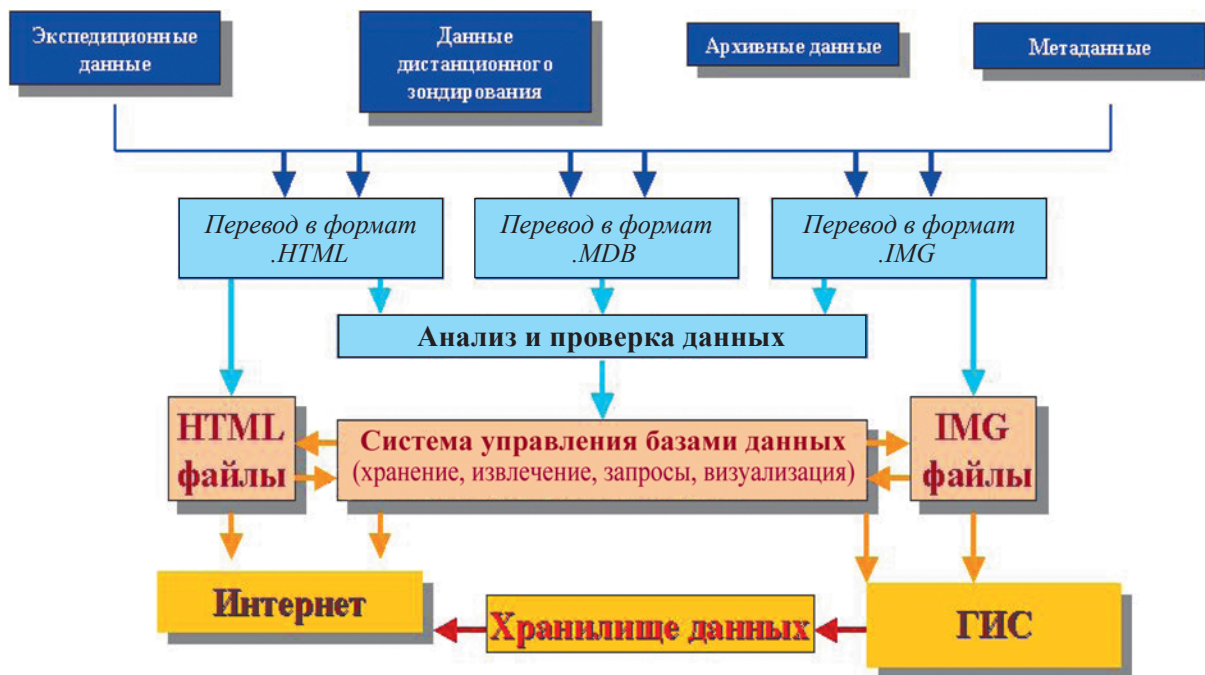


Рис. 1. Структура информационной системы для Белого моря и водосбора [47]

чрезвычайных ситуациях, когда требуется оперативный прогноз.

Представленные в атласе сведения могут использоваться для создания системы поддержки принятия управленческих решений, касающихся Арктической зоны Российской Федерации. Прототипами такой системы могут служить система NEST, разработанная странами ЕС для Балтийского моря [55], или информационная система для интегрированного управления ресурсами системы «Ладожское озеро — Нева — Невская губа» [1], в которых электронный атлас, базы данных и математические модели являются основными элементами [27].

Электронный атлас «Белое море и водосбор» будет также включать информационный комплекс — систему оперативного мониторинга гидрофизических полей, разработанную в Институте океанологии РАН при участии ИВПС КарНЦ РАН и представляющую собой базы данных натуральных контактных, дистанционных измерений и математическую модель, ассимилирующую входную информацию для расчетов состояния термогидродинамики моря и для прогнозистических расчетов при разных комплексах гидрометеорологических условий [16; 41].

Разрабатываемый ИВПС КарНЦ РАН комплексный атлас Беломорья содержит следующие главы:

1. Физико-географические особенности Белого моря и водосбора.
2. Гидролого-гидрохимический режим водосбора Белого моря.
3. Особенности изменчивости гидрофизических процессов и полей Белого моря.
4. Гидрохимия.

5. Гидробиология моря.
6. Социально-экономические особенности водосбора.
7. Аэрокосмические данные.
8. Природные и культурные памятники.
9. Библиография.

#### Разработка информационных систем

Структура информационной системы была ранее разработана В. В. Растоскуевым [39; 40] и применена для Белого моря [47], использована в ГИС, созданной по проекту INCO-Copernicus ICA2-CT-2000-10014 [56]. Эта же структура (рис. 1) в дальнейшем использована в дополненной и обновленной базе данных, созданной средствами ГИС, которая получила государственную регистрацию [10].

ИВПС КарНЦ РАН совместно с ИПМИ КарНЦ РАН [26] разработали информационно-справочную систему «Белое море» — сетевой ресурс, созданный для работы в «ArcView GIS» (или «MapInfo»), требующий предварительной настройки программного обеспечения. Система позволяет загружать данные с помощью ГИС-сервера, формировать запрос на поиск данных и их пополнение, редактировать базы метаданных. ГИС-сервер включает в себя хранилище данных, базу метаданных и web-сервер с сайтами администратора. Хранилище данных содержит файлы тематических слоев карт (файлы с расширением .shp и тематические базы данных), графические файлы и тексты. Разработанный специальный ГИС-браузер, состоящий из нескольких блоков (инсталляции, приема данных, декодирования данных, пользовательских функций), обеспечивает прием на клиентской стороне

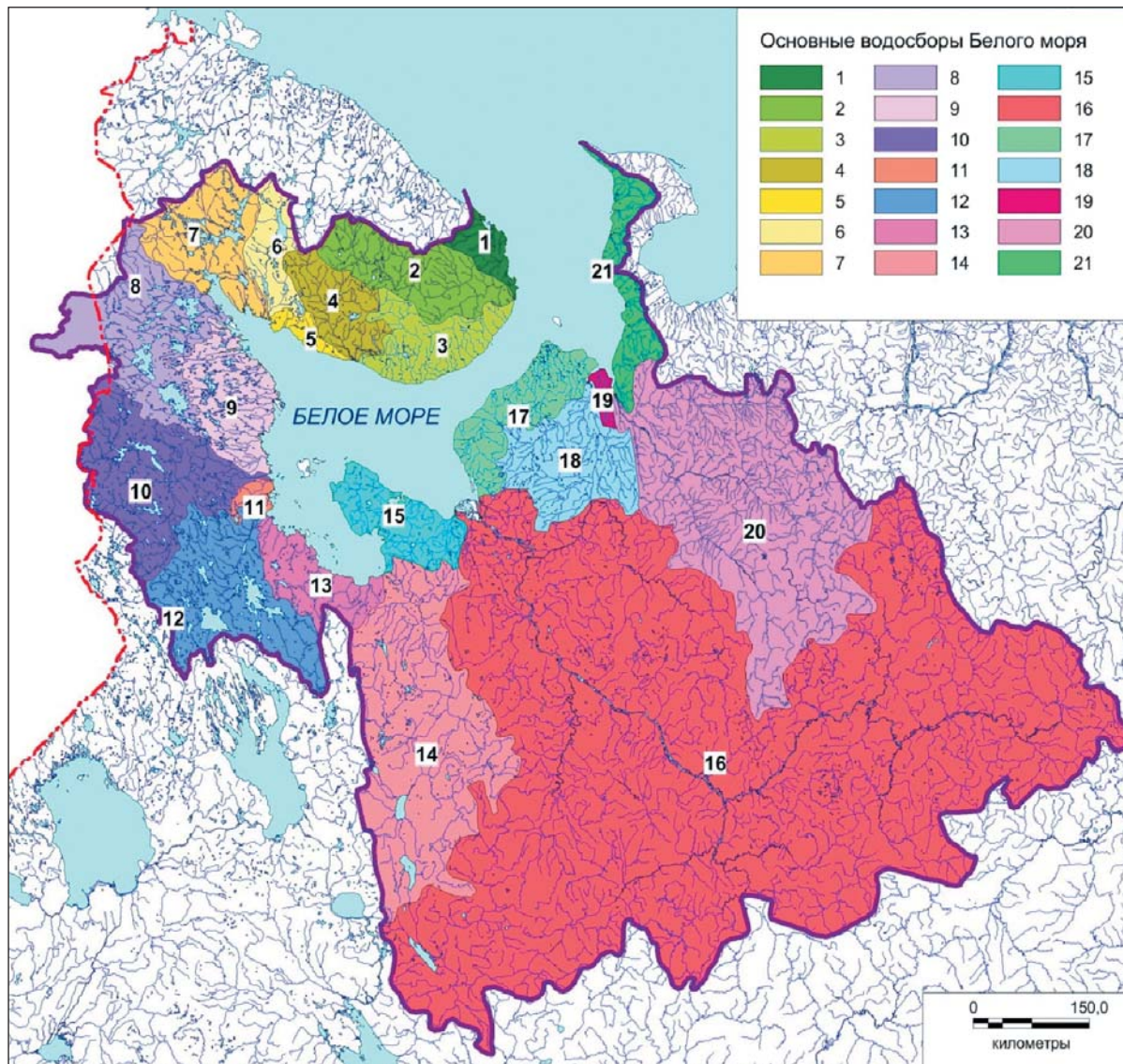


Рис. 2. Основные водосборы Белого моря: 1 – малые притоки от устья Поноя до мыса Святой Нос, 2 – Поной, 3 – малые притоки от Варзуги до Поноя, 4 – Варзуга, 5 – малые притоки от Умбы до Варзуги, 6 – Умба, 7 – Нива и малые притоки от устья Ковды до устья Умбы, 8 – Ковда, 9 – малые притоки от устья Ковды до устья Кеми, 10 – Кемь, 11 – малые притоки от устья Кеми до Беломорско-Балтийского канала, 12 – Беломорско-Балтийский канал (Выг), 13 – малые притоки от Беломорско-Балтийского канала до устья Онеги, 14 – Онега, 15 – малые притоки от устья Онеги до устья Северной Двины, 16 – Северная Двина, 17 – малые притоки от устья Северной Двины до устья Кулоя, 18 – Кулой, 19 – малые притоки от устья Кулоя до устья Мезени, 20 – Мезень, 21 – малые притоки от устья Мезени до мыса Канин Нос

затребованных файлов геопроектов и последующую их обработку в автономном режиме.

При создании атласа Беломорья используется опыт разработки системы поддержки принятия решений, который имеется в ИВПС КарНЦ РАН по созданию ГИС «Водные объекты Республики Карелия» [46]. Работы выполнялись совместно с коллегами из отдела ГИС-технологий Петрозаводского государственного университета по заданию Министерства природных ресурсов Карелии. Система входит в Единую географическую информационную систему (ЕГИС) Республики Карелия (РК).

Весь водосбор Белого моря разбит на 21 частный водосбор (рис. 2). Основная информация о водных объектах представлена по данным публикаций, изложенных в ряде работ [33; 44].

Специализированная автоматизированная система ГИС «Водные объекты Республики Карелия» создана с применением современных геоинформационных технологий [46], цифровых карт отечественного производства в масштабе 1:1 000 000. Система создана для обеспечения процесса формирования, ведения и представления данных по наличию и использованию водных ресурсов Республики Карелия,

взимания платы за пользование водными объектами, для их рационального использования и охраны.

На первом этапе выполнены инвентаризационные работы с созданием электронных реестров с помощью ГИС-технологий [22], позволяющих оценить современный водоресурсный потенциал региона [18; 23]. Эта задача актуальна не только для самого озерного региона страны — Карелии [13; 34], но и в целом для России. Реализация водной политики на любой территории невозможна без создания современной информационной системы по водным ресурсам и их использованию.

Для достижения поставленных целей в ИВПС КарНЦ РАН были решены следующие задачи:

- разработано прикладное программное обеспечение для формирования информации по водным объектам, водопользователям и гидротехническим сооружениям на территории РК;
- сформирована цифровая картографическая база данных, содержащая картографическую и атрибутивную информацию по водным объектам, водопользователям и гидротехническим сооружениям на территории РК;
- разработана структура базы данных и справочников;
- разработана организационно-технологическая схема для актуализации цифровых картографических и атрибутивных данных по водному фонду РК с необходимой периодичностью;
- разработан регламент информационного обмена между специальной ГИС «Водные объекты на территории Республики Карелия» и ЕГИС РК.

Кроме «Каталога...» для характеристики водных объектов использовались базы данных по «Водопользователям РК» [11; 12] и «Гидротехническим сооружениям», разработанные в ИВПС КарНЦ РАН. Для уточнения топологии применялись атласы РК [8]. Работы выполнены на основании разрешения Северо-Западного окружного управления геодезии и картографии № 1076 от 1 июля 2009 г. и лицензионного программного обеспечения «MapInfo 9.5».

Структура ГИС «Водные объекты Республики Карелия» состоит из нескольких цифровых картографических баз данных: «Водосборные бассейны РК», «Водоемы», «Водотоки», «Водохозяйственные участки», «Водопользователи РК», «Разрешительные документы водопользователей РК», «Гидроэнергетика РК», «Водозабор РК», «Водосброс РК», «Водный транспорт РК», «Рекреация РК», «Координаты водных объектов РК», содержащих картографическую и атрибутивную информацию. Все базы данных в ГИС связаны между собой кодификатором, что обеспечивает возможность оперативной работы с информацией по средствам запросов, а также позволяет создавать различные тематические карты. Для водных объектов «Водоемы» и «Водотоки» была разработана система уникальных кодов, которая позволила идентифицировать 3524 озера и 2069 рек на карте масштаба 1:1 000 000. Структура таблиц

по водным объектам включает информацию о кадастровом номере, морфометрии (площади озера, длине береговой линии, глубине, длине реки и т. п.), водоохранных зонах, прибрежных защитных полосах и категориях рыбохозяйственной значимости.

База данных «Водопользователи» состоит из шести таблиц, связанных уникальными кодами. Основная таблица этой базы данных «Общие сведения о водопользователях» содержит название водопользователя и юридическую информацию о нем. Остальные пять таблиц содержат тематические данные по отдельным видам водопользования: гидроэнергетике, забору воды, сбросу воды, использованию акваторий для водного транспорта и целям рекреации.

Для ГИС «Водные объекты» разработана система запросов на получение информации:

- о конкретном водопользователе (наименование, юридический адрес, используемые водные объекты, гидротехнические сооружения, срок действия разрешительных документов (лицензия, договор, решение), объем забираемых водных ресурсов, количество сбрасываемых сточных вод, количество производимой электроэнергии, наличие контрольно-измерительной аппаратуры);
- о водном объекте (название водного объекта, код и наименование водохозяйственного участка, характеристики водного объекта, ширина водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы, индекс загрязненности, наименование водопользователей, цели использования данного водного объекта; в графическом варианте есть показ гидротехнических сооружений, расположенных на нем);
- по использованию водных объектов (наименование водопользователей, производительность, мощность, наличие контрольно-измерительной аппаратуры, координаты);
- по использованию акватории водных объектов (название водных объектов, наименование водопользователей, площадь используемой акватории, цель использования, координаты);
- о водозаборных и водосбросных сооружениях и их производительности (наименование водопользователя, год постройки, сведения о собственности, наличие контрольно-измерительной аппаратуры);
- по водохозяйственному участку (название водного объекта, наименование водопользователя, объем забора, объем сброса);
- сводный запрос по Республике Карелия (общее количество водопользователей, общий объем забора водных ресурсов, общий объем сброса сточных вод, общее количество вырабатываемой электроэнергии, общая площадь используемой акватории).

В ГИС «Водные объекты на территории РК» в рабочем наборе «MapInfo» представлена цифровая карта, содержащая базовые топографические слои и тематические данные по водным объектам, водосборным бассейнам, водопользователям и гидротехническим сооружениям на территории Республики Карелия (рис. 3).

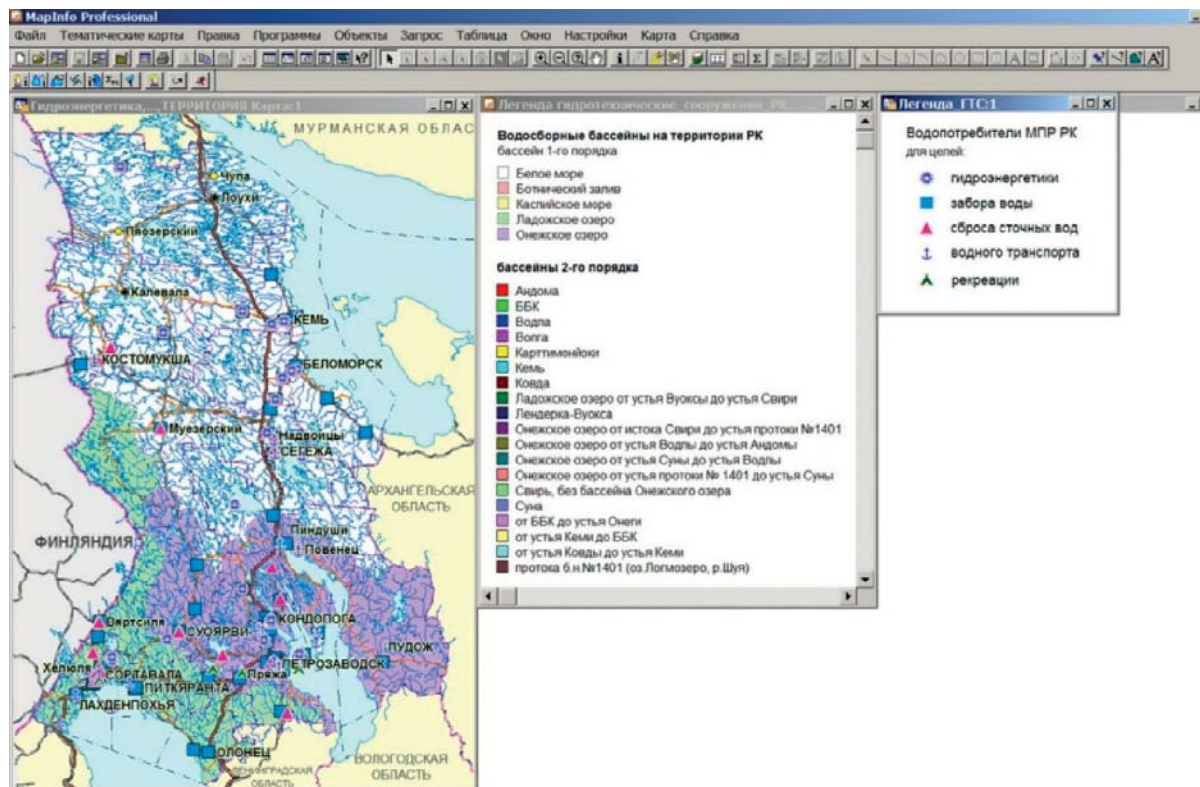


Рис. 3. Главное окно ГИС «Водные объекты на территории Республики Карелия»

При этом в главное меню «MapInfo» добавлен пункт «Тематические карты», а также специальная инструментальная панель, которая позволяет автоматически выполнять необходимые запросы, дает возможность оперативно создавать тематические карты по значению индекса загрязненности, по объемам забора водных ресурсов в районах РК, по объемам сброса сточных вод в районах РК.

В ГИС предусмотрено редактирование и добавление тематической информации с помощью интерфейсных форм и диалогов пользователя. Созданная геоинформационная система «Водные объекты на территории Республики Карелия» в настоящее время применяется Министерством природопользования и экологии РК для информационно-картографического обеспечения деятельности, а также заинтересованными ведомствами. Она может быть использована как прототип в различных регионах России.

### Разработка экспертных систем

Создание баз данных, баз знаний и ГИС природных ресурсов для Арктической зоны осложняется слабой изученностью ресурсов региона. Например, в России около 2,8 млн озер, однако изучено менее 1%. Таким образом, нет достаточных сведений для оценки водных и биологических ресурсов озер. Это же относится к другим ресурсам Арктической зоны, исследование которой за последние двадцать лет было существенно ослаблено. Поэтому

важно внедрять современные геоинформационные технологии, дистанционные методы, позволяющие дать оценку этих ресурсов по водным объектам. Такой опыт накоплен в ИВПС КарНЦ РАН и Санкт-Петербургском экономико-математическом институте РАН (СПб ЭМИ РАН) при создании экспертных систем [30; 31].

В связи с отсутствием или недостатком информации о ресурсах озер, главным образом водных и биологических, требуется разработать новые эффективные методы и средства их изучения. Имеются разработки экспертных систем (ЭС) озер с использованием методов искусственного интеллекта и математического аппарата нечеткой логики [20; 30].

Для разработки ЭС в ИВПС КарНЦ РАН была создана база данных по морфометрии, гидрологии, гидрохимии и гидробиологии для 225 наиболее изученных озер на основе разработанной ранее ГИС «Озера и реки РК» [13; 23]. На предварительном этапе была выполнена классификация озер методами многомерной статистики, факторного, кластерного и логико-информационного анализа с использованием метода многомерного шкалирования [30]. Экспертная система предназначена для классификации озер, определения трофического статуса, оценки водных и биологических ресурсов и определения рациональных путей промышленного использования общества для получения максимального вылова и сохранения биологического разнообразия водоемов. Ряд характеристик озер носит не количественный,

а качественный характер. Такие признаки называются номинальными, к ним относятся типы грунтов, списки видов макрофитов, зоопланктона, бентоса и рыб. Для изучения связей между порядковыми и номинальными характеристиками озер Карелии применялись методы информационно-логического анализа, которые достаточно широко использовались ранее в географических исследованиях [31]. Их сущность состоит в сравнении энтропии распределения некоторой природной характеристики при отсутствии какой-либо информации об объекте исследования с энтропией той же характеристики, когда имеется дополнительная информация. Первая энтропия называется априорной, вторая — апостериорной. Была изучена информационная значимость всех используемых параметров (грунтов, макрофитов, цветности воды и пр.).

Кратко остановимся на особенностях создания самой экспертной системы, которая дает возможность определить одни характеристики озера, если известны какие-либо другие, например, по площади озера оценить возможный состав ихтиофауны или биомассу бентоса. Целесообразно представить характеристики озера в виде нечетких множеств, а для определения одних характеристик озера по другим применить аппарат нечеткой логики, который в последние годы применялся достаточно широко.

Определение функции принадлежности неизвестной характеристики озера  $\mu_C$  по данным о функции принадлежности другой характеристики озера  $\mu_A$  и отношению между этими двумя характеристиками согласно матрице  $M_{AC}$  производится при помощи нечеткого логического вывода (нечеткой импликации) [20]:

$$\mu_C(j) = \max_{j \in N} \left\{ \min [\mu_A(j), \mu_{AC}(j, i)] \right\}$$

где  $N$  — множество всех интервалов шкалирования.

Переходя к описанию номинальных признаков озер, отметим, что согласно терминологии, принятой в теории нечетких множеств, они соответствуют лингвистическим переменным [20]. Применительно к озерам Карелии к таким переменным относятся характеристики грунтов, списки видов рыб, макрофитов и бентоса. Если при традиционном рассмотрении подобная переменная могла принимать только два значения (например, «есть» или «нет»), то в теории нечетких множеств функция принадлежности может принимать любое значение от 0 до 1. Значение «1» соответствует абсолютной уверенности в существовании данного признака, а значение «0» — абсолютной уверенности в его отсутствии.

В разработанной для озер Карелии ЭС используются 94 лингвистические переменные, функции принадлежности которых отображаются на интерфейсе ЭС. Если об озере ничего не известно кроме того, что оно расположено в Карелии и его площадь больше 50 га, то функции принадлежности окуня, щуки и плотвы близки к единице, а функция

принадлежности карася близка к нулю. Работа экспертной системы заключается в том, чтобы уточнить эти функции, вводя в систему дополнительную информацию о характеристиках озера. Отнесение озера к некоторому трофическому типу, например, олиготрофному, мезотрофному, эвтрофному или дистрофному, является одной из фундаментальных проблем лимнологии. Если можно строго отнести конкретное озеро к определенному трофическому типу, это очень много говорит о его экосистеме. Оказалось, что для корректной оценки трофности озер Карелии недостаточно знания таких величин, как первичная продукция фитопланктона или концентрация хлорофилла «а». Выход состоит в том, чтобы считать трофический статус озера величиной нечеткой и тем самым свести операцию его определения к вычислению функции принадлежности этой величины. Поэтому необходимо придать экспертной системе свойства так называемого приобретенного знания. Иными словами, предлагается на основании относительно небольшого числа измерений первичной продукции фитопланктона установить связи этой характеристики с остальными характеристиками озер, которые уже есть в базе знаний ЭС.

Далее на основе так называемого приобретенного знания выполняются расчеты на ЭС. Интерфейс экспертной системы, отображающий процесс оценки трофического статуса озера, представлен на рис. 4. База знаний системы расширена за счет добавления сведений о показателе развития береговой линии (KM), коэффициенте условного водообмена (KW), показателе относительной глубины (ALFA), сумме неорганических ионов (SI), биологическом потреблении кислорода (BDO5), максимальной продукции фитопланктона (AMAX), суммарной суточной первичной продукции (SUM\_D), суммарной годовой первичной продукции (SUM\_Y), концентрациях водородных ионов (pH), органического вещества в воде (BO), общего железа (Tfe), общего фосфора (TP), общего азота (TN), хлорофилла «а» (CHLA). Все эти данные были шкалированы. Клавиши 1—7 и окно отображения функции принадлежности в левой части интерфейса служат для ввода исходных данных. Переключатели у каждой переменной служат для включения данной переменной в процесс определения трофического статуса озера. Клавиши «Classification» предназначены для выбора характеристики, по которой производится оценка трофического статуса [30].

Оказалось, что для многих озер оценки трофности были нечетко определенными, «размытыми», выяснилось, что имеет место так называемое проклятие неоднозначности оценки. Таким образом, даже современными методами искусственного интеллекта не всегда удается преодолеть трудности оценки. Показано, что успех создания экспертной системы определяется в первую очередь качеством и организацией баз данных и знаний. Проведенная рабо-



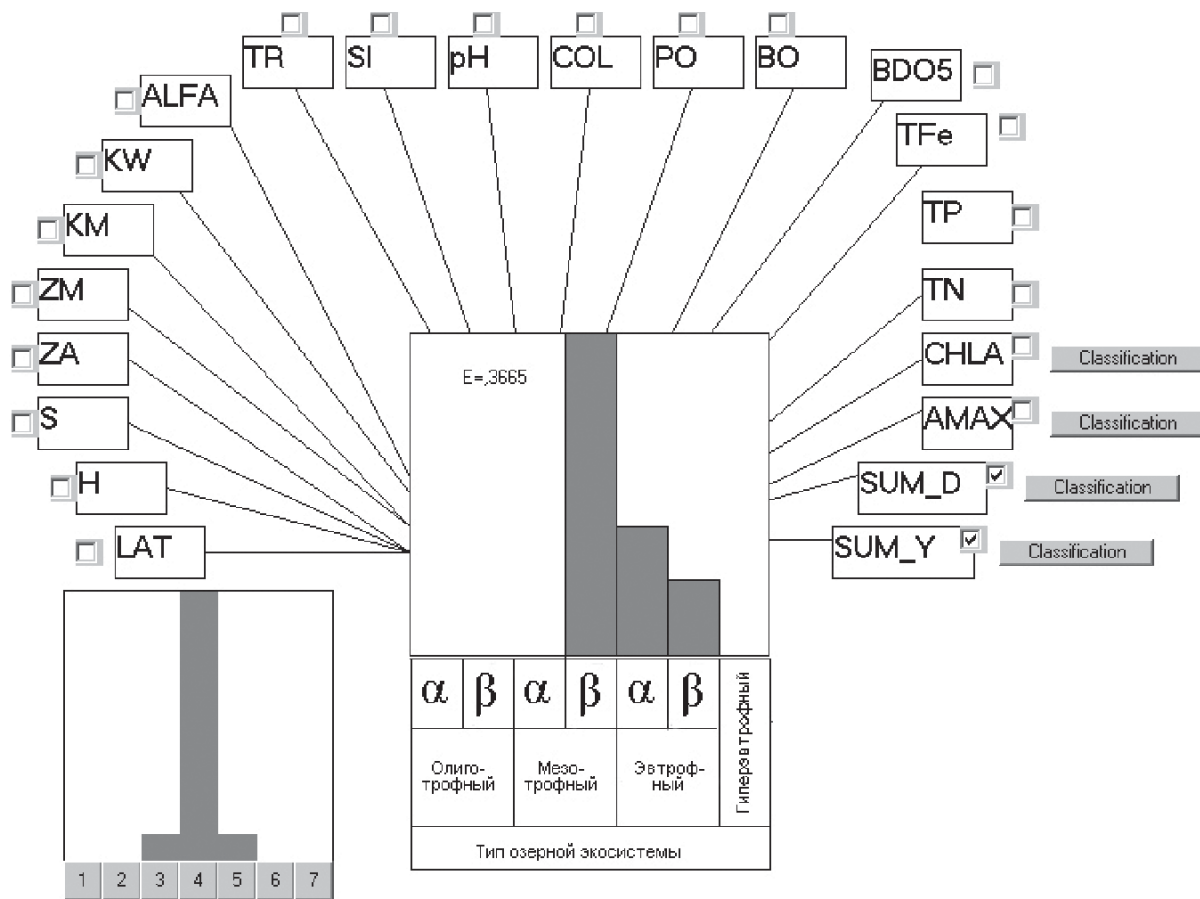


Рис. 4. Интерфейс экспертной системы (окно определения трофического статуса озера)

та наглядно показала возможность создания такой системы и для других озерных регионов.

Сообщество рыб, обитающих в озере, — неотъемлемая часть экологической системы. Подобный подход привлекателен тем, что в его основе лежат такие общие экологические представления, как законы сохранения вещества и круговорота биогенов в экологической системе. Однако далеко не все процессы, происходящие в сообществе рыб, можно достаточно адекватно описать в терминах продукционной гидробиологии [1]. Видовые особенности каждой популяции, структура их возрастного состава и многое другое выпадает из рассмотрения. В работе рассматривается также и популяционный подход, но не в рамках одной популяции, как это делается в классической теории, а для всего сообщества рыб данного водоема.

Экспертная система разработана для оценки состояния и перспектив развития промысла сообществ рыб малых и средних озер Карелии, но предложенные решения приемлемы и для отдельных плесов крупнейших озер. Основная идея построения модели ихтиоценоза озера заключается в разделении описания трофических, популяционных и промысловых процессов, которые происходят в сообществе рыб. Система включает в себя базу знаний о 12 видах

наиболее распространенных рыб Карелии и модель сообщества, основанную на принципе трофической сети. Уточнение неопределенных параметров модели производится методом случайного поиска. Отметим, что многие ранее разработанные модели сообществ рыб относились к конкретным водоемам и не были универсальными. Разрабатываемая система нацелена на использование для различных водоемов с разным составом ихтиоценозов и различными кормовыми и абиотическими условиями. Это потребовало введения в систему специального средства для автоматической корректировки параметров модели. Система позволяет не только оценить ихтиомассы и возрастную структуру популяций, но и определить рациональные пути промыслового использования сообщества для получения максимального вылова и сохранения биологического разнообразия. База знаний открыта для неограниченного пополнения.

Основной результат, полученный с помощью ЭС, заключается в том, чтобы на конкретных примерах показана важность экосистемного подхода к определению оптимальных режимов промысла. При планировании выловов объектом эксплуатации должна быть не отдельная популяция промысловой рыбы, а все сообщество рыб данного водоема. Указанные



Рис. 5. Схема процесса управления водными ресурсами Белого моря (с исправлениями по [29])

модели представляют собой составную часть экспертной системы по определению свойств и оптимизации использования природных ресурсов озер Карелии. При соединении с банком данных по озерам Карелии модели сообществ рыб, населяющих эти озера, представляют собой аппарат не только для уточнения рыбной продуктивности данных водоемов, но и для построения планов их рационального хозяйственного использования. Разработанная методика может использоваться для более однозначного, чем ранее, оценивания ресурсов озер, служить инструментом управления для охраны и рационального использования озер и их ресурсов.

Описанная система может служить прототипом при разработке экспертных систем озер, по которым нет непосредственных наблюдений или их недостаточно, в разных ландшафтных зонах Российской Федерации.

Создание компьютерных систем поддержки принятия решений по управлению водными системами началось достаточно давно [27], они уже нашли применение для крупных озер и системы «Ладога — Нева — Невская губа» [1; 54] в плане решения задач сохранения ресурсов водных объектов.

Представленные выше разработки вместе с созданными в СПб ЭМИ РАН моделями экосистем водоемов [31; 54] использовались для создания системы управления ресурсами озер, поддержки принятия решений [29]. Подобную систему с некоторыми изменениями можно применить и для Беломорья, тем более что для ее создания имеются разработанные базы данных и знаний [11; 14; 44], социо-эколого-

экономические модели, математические модели для Белого моря и водосбора [45; 49; 56], а также фундаментальные работы коллектива под руководством академика А. П. Лисицына [42; 43] (рис. 5).

Важной задачей при разработке систем управления экосистемами является идентификация математической модели с помощью алгоритма оптимизации, который дает возможность оценить способность модели отображать основные свойства управляемого объекта. При оптимизации важен выбор критерия. В работе В. В. Меншуткина и др. [29] при подборе критерия оптимизации предлагается исходить из принципов устойчивого развития и понятия ассимиляционного потенциала [31; 54].

В [29] для оптимизации использован так называемый генетический алгоритм, который отвечает свойствам функции отклика озерных экологических систем на те или иные антропогенные воздействия. С учетом разработок по моделированию водных экосистем, которые имеются у авторов [14; 54; 56], этот алгоритм применим и для Белого моря. Можно решать задачу управления экологической системой в терминах теории игр и рассматривать ее как «игру с природой», когда понятие «стратегия природопользования» имеет конкретный смысл и рассматривается как математический объект [28].

### Заключение

Предложены разработки электронного атласа Белого моря и водосбора, даны примеры созданных геоинформационных и экспертных систем, которые могут быть применены для ресурсных, социо-

экономико-экологических ГИС при обосновании мероприятий по рациональному использованию и сохранению ресурсов, для разработки систем поддержки принятия решений как для Беломорья, так и для других регионов Арктической зоны Российской Федерации.

Атлас будет использоваться для решения широкого круга научных и практических задач, рационального использования ресурсов моря, поиска полезных ископаемых, при принятии решений во время чрезвычайных ситуаций, прогнозе состояния моря при разнообразных природно-климатических и антропогенных сценариях, а также при возможных ситуациях, требующих оперативного прогноза и принятия управленческих решений.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-05-00663, 13-05-98802 и РНФ 14-17-00740.

### Литература

1. Алимов А. Ф. и др. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области: Опыт создания системы поддержки принятия решений. — СПб.: Vorey Print, 2001. — 419 с.
2. Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря: Аннотированный атлас. — Мурманск: Изд. ЗИН АН СССР, 1991. 215 с.
3. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878—2013) / Ред. Г. Г. Матишов, С. В. Бердников, А. П. Жичкин и др. — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2004. — 256 с.
4. Атлас Белого моря / Сост. при Гидрографическом депо Главного морского штаба е. и. в. по наблюдениям и промеру, произведенным с 1827 по 1833 г. под начальством капитан-лейтенанта Рейнеке. Гравир. 1833 года. — [СПб.: Гидрогр. департ. Морского м-ва], 1833. — 14 л. Приложение. Гидрографическое описание северного берега России, составленное капитан-лейтенантом М. Рейнеке в 1833 году: в 2 ч. — Ч. 1: Белое море. — 1850. — 567 с. разд. паг., карт., ил.; Ч. 2: Лапландский берег. — 1843. — 373 с. разд. паг., табл., ил.
5. Атлас Белого моря с прилежащими заливами Онежским и Кандакшским / Сост. Л. И. Голищев-Кутузов. — [СПб., 1825—1827].
6. Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. — М.: WWF России, 2011. — 64 с. с ил.
7. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан / М-во обороны СССР. Гл. упр. навигации и океанографии. — М., 1980. — 190 с.
8. Атлас Республики Карелия. Масштаб 1:200 000 / Воен.-геогр. упр. Генер. штаба. — М., 1997. — 136 с.
9. Атлас-определитель макрофитов Белого моря / М. М. Болдунан. — М., 2011. — 160 с. с ил.
10. Атлас «Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения». — М.: Феория, 2013.
11. База данных. Белое море и его водосбор / Авт.: Толстикова А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э. —

Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2010620435 от 16 августа 2010 г.

12. База данных. Водные объекты Республики Карелия / Авт.: Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С. — Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2011650139 от 16 февраля 2011 г.
13. База данных. Озера Карелии / Авт.: Филатов Н. Н., Кухарев В. И., Потахин М. С. — Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2011620137 от 16 февраля 2011 г.
14. Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Ред. Н. Филатов, А. Тержевик. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. — 349 с.
15. Биологический атлас морей Арктики 2000: планктон Баренцева и Карского морей / Мурман. мор. биол. ин-т; КНЦ РАН. — Мурманск, 2000. — Электронный атлас.
16. Волженский М. Н., Родионов А. А., Семенов Е. В. и др. Опыт верификации оперативной модели мониторинга Белого моря в 2004—2008 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2009. — Т. 5. — С. 33—42.
17. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 1 и 2: Белое море. — Л.: Гидрометеиздат, 1991.
18. Государственный водный кадастр. — Разд. 1. — Сер. 3: Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. — Ч. 1, 2. — Т. 1: РСФСР, вып. 7: Бассейны рек западного побережья Белого моря. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 220 с.
19. Дженюк С. Л. К оценке океанологической изученности Баренцева и Белого морей // Вестн. МГТУ. — 2012. — Т. 15, № 4. — С. 739—748.
20. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение в принятии приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 165 с.
21. Иллюстрированный атлас беспозвоночных Белого моря / Ред. Н. Н. Марфенина. — М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. — 312 с.
22. Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. и др. Основы геоинформатики. — М., 2004. — 352 с.
23. Каталог озер и рек Карелии / Ред. Н. Н. Филатов, А. В. Литвиненко. — Петрозаводск, 2001. — 290 с.
24. Климат морей России и ключевых районов Мирового океана: Электронный атлас [входит в Единую систему информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)] / ВНИИГМИ МЦД. — Обнинск, [Б. г.] ([http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1\\_1.html](http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1_1.html)).
25. Комплексный электронный атлас Белого моря по проекту ICA2-CT-2000-10014 «Sustainable Management of the Marine Ecosystem and Living Resources of the White Sea (WHITESEA)» / Авт.: О. М. Йоханнесен, Л. Х. Петтерсон, Д. В. Поздняков и др. — [Б. м.], 2003.
26. Лебедев В. А., Филатов Н. Н. Коллекция знаний об Онежском и Ладожском озерах / Труды 3-й Всероссийской конференции по электронным библиотекам: Электронные библиотеки: Перспективные методы и технологии, электронные коллекции. RCDL'2001. — Петрозаводск, 2001. — С. 202—208.
27. Львов В. В. Создание систем поддержки принятия решений на основе хранилищ данных // Системы управления базами данных. — 1997. — № 3. — С. 30—40.

28. Мазалов В. В. Математическая теория игр и приложения. — Санкт-Петербург; Москва; Краснодар; Лань, 2010. — 448 с.
29. Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер / *Вод. хоз-во России*. — 2014. — № 4. — С. 100—110.
30. Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Разработка экспертной системы «Озера Карелии». — Ч. 1: Порядковые и номинальные характеристики озер // *Вод. ресурсы*. — 2009. — Т. 36, № 2. — С. 160—171.
31. Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). — 1. Гидродинамика озер // *Вод. ресурсы*. — 2013. — Т. 40, № 6. — С. 1—17.
32. Данилов А. И., Дмитриев В. Г., Кочемасов Ю. В. и др. Национальные и международные приоритеты в Арктике / ГУ ААНИИ. — СПб., 2008. — 70 с.
33. Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгалов В. А. Реки российской Арктики. — Ростов н/Д, 2007. — 271 с.
34. Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Нухарев. — Петрозаводск, 2013. — 464 с.
35. Онежское озеро: Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. — Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2010. — 151 с.
36. Отчет по проекту ИНКО-Коперникус «Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White Sea» № ICA2-1999-10014. — [Б. м.], 2003. — 176 с.
37. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Техническое резюме. — М.: Росгидромет, 2008. — 89 с.
38. Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер: по маршруту экспедиции Русского географического общества «Историко-географические памятники Европейского Севера России» / М. С. Богданова, С. П. Гриппа, Н. В. Лобанова и др.; Фото: И. Ю. Георгиевский. — Петрозаводск: Verso, 2010. — 95 с.
39. Растоскуев В. В. Экспертная система для обработки данных контроля загрязнений атмосферы. — СПб.: НИЦЭБ РАН, 1997. — 261 с.
40. Растоскуев В. В., Донченко В. К., Филатов А. Н. Разработка экоинформационной системы «Белое море» // *Материалы международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения» / ИЭПС*. — Архангельск, 2002. — С. 772—773.
41. Семенов Е. В., Булатов М. Б. Анализ результатов работы оперативной модели гидрофизических полей Белого моря в июле-августе 2008 г. // *Докл. Академии наук*. — 2010. — Т. 432, № 3. — С. 410—415.
42. Система Белого моря: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера Белого моря / Ред. А. П. Лисицын, И. А. Немировская. — М.: Науч. мир, 2012. — 780 с.
43. Система Белого моря: Природная среда водосбора Белого моря / Ред. А. П. Лисицын, И. А. Немировская, В. П. Шевченко. — М.: Науч. мир, 2010. — 478 с.
44. Филатов Н. Н. Сток рек // *Система Белого моря: Природная среда водосбора Белого моря*. — Т. 1. — М.: Науч. мир, 2010. — С. 266—277.
45. Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Тержевик А. Ю. Беломорье — регион для решения актуальных проблем Арктики // *Арктика: экология и экономика*. — 2011. — № 2. — С. 90—101.
46. Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Богданова М. С. Опыт создания ГИС «Водные объекты территории Республики Карелия» для решения задач управления // *Вода*. — 2012. — № 1 (53). — С. 46—50.
47. Филатов Н. Н., Филатов А. Н. Опыт использования ГИС-технологий для Internet для решения водно-экологических задач // *Методы математического моделирования и информационные технологии*. Труды рабочего совещания «Новые Интернет-технологии». Петрозаводск, 25—28 июня 2000 г. — Вып. 2. — Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000. — С. 81—84.
48. Флора и фауна Белого моря: иллюстрированный атлас / Ред. А. Б. Цетлина, А. Э. Жадан, Н. Н. Марфенина. — М., 2010. — 471 с.; 1580 ил.
49. Чернов И. А., Толстиков А. В. Расчет гидрологических характеристик Белого моря по двум моделям термогидродинамики на вычислительном кластере // *Материалы международной научно-практической конференции «LXVI Герценовские чтения»*. — СПб.: Астерион, 2013. — С. 51—54.
50. Электронный атлас «Белое море. Мыс Картеш». — СПб.: ЗИН РАН, 2003.
51. Яковлев Н. Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948—2002 гг. — Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 1—16.
52. Climatic Atlas of the Arctic Seas 2004. NOAA Atlas NESDIS 58 / World Data Center for Oceanography-Silver Spring; U.S. Government Printing Office. — Washington, D.C., 2004. — 148 p. — CD-ROM. — (Intern. Ocean Atlas and Information Series; Vol. 9).
53. Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Eds.: L. Bengtsson, R. W. Herschy, R. W. Fairbridge. — Dordrecht; Heidelberg; New York; London: Springer, 2012. — 953 p.
54. Ladoga and Onego: Great European Lakes. Modelling and experiment / L. A. Rukhovets, N. N. Filatov (eds.). — [S. l.]: Springer-Praxis, 2010. — 302 p.
55. Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea / *Hydrobiologia*. — 2009. — № 629. — P. 209—224. — doi 10.1007/s10750-009-9775.
56. White Sea: Its Marine environment and Ecosystem dynamics influenced by global change // N. N. Filatov, D. Pozdnjakov, O. Johannessen et al. — London: Springer-Praxis, 2005. — 472 p.