



МОРЯ, ОЗЕРА И ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ВОДОСБОРЫ РОССИИ, ФИНЛЯНДИИ И ЭСТОНИИ

Лекции научных сотрудников,
преподавателей и молодых ученых для вузов

(по докладам
Международной молодежной
школы-конференции)



Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН
Научно-образовательный центр ИВПС КарНЦ РАН
Петрозаводский государственный университет
Отделение РГО в Республике Карелия

МОРЯ, ОЗЕРА И ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ВОДОСБОРЫ РОССИИ, ФИНЛЯНДИИ И ЭСТОНИИ

ЛЕКЦИИ НАУЧНЫХ СОТРУДНИКОВ, ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДЛЯ ВУЗОВ

(по докладам Международной молодежной школы-конференции)

ПЕТРОЗАВОДСК
2015

УДК 556.5 (470)(480)(474.2)
ББК 26.22 (2Рос)(4Фин)(4Эст)
М79

Редакционная коллегия:

Н. Н. Филатов, член-корреспондент РАН
Д. А. Субетто, докт. геогр. наук
Т. И. Регеранд, канд. биол. наук

Рецензенты:

Р. У. Высоцкая, докт. биол. наук, Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск
Г. Н. Панин, докт. г.-м. наук, профессор, Институт водных проблем РАН, Москва

М79 **Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии.** Лекции научных сотрудников, преподавателей и молодых ученых для вузов (по докладам Международной молодежной школы-конференции). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.

ISBN 978-5-9274-0677-7

Предлагаемый сборник лекций ведущих специалистов, научных сотрудников, молодых ученых и преподавателей университетов подготовлен по материалам, представленным на Международной школе-конференции «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии», проходившей в Петрозаводске 11–13 ноября 2014 г. Лекции объединены в два раздела: часть 1 «Современные проблемы лимнологии и океанологии» и часть 2 «Палеолимнология, палеоклиматология, историческая география, климат». Инновационным моментом издания является попытка представить современные результаты научных исследований как ведущих научных сотрудников, так и молодых ученых совместно с фундаментальными данными по каждой теме. Молодые ученые получили возможность изложить свои научные достижения в виде лекций, основываясь на опыте докторов наук и преподавателей ведущих университетов России, а также зарубежных коллег.

Сборник лекций может быть использован в качестве дополнительного учебного пособия для аспирантов, студентов вузов, учащихся старших классов средних школ, абитуриентов, специалистов, а также в широких научно-познавательных целях.

УДК 556.5 (470)(480)(474.2)
ББК 26.22 (2Рос)(4Фин)(4Эст)

Подготовка и проведение Международной школы-конференции «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии» и издание материалов осуществлялись при финансовой поддержке ФАНО России в рамках реализации мероприятий по поддержке молодых ученых в 2014 г. с учетом финансирования по целевой программе Президиума Российской академии наук «Поддержка молодых ученых».

ISBN 978-5-9274-0677-7

© Карельский научный центр РАН, 2015
© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2015
© Петрозаводский государственный университет, 2015
© Отделение РГО в Республике Карелия, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник лекций ведущих специалистов, научных сотрудников, молодых ученых и преподавателей университетов подготовлен по материалам, представленным на Международной школе-конференции «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии», проходившей в Петрозаводске 11–13 ноября 2014 г.

Тема конференции была выбрана не случайно, поскольку проблема гармонизации подходов к исследованию, оценке состояния, совместного использования и охраны трансграничных водоемов и их водосборов для России и стран Европейского Союза (Финляндии, Эстонии) является весьма актуальной. Примером таких водных объектов являются крупнейшие озера Европы – Ладожское и Онежское, Псковско-Чудское озеро, озеро Пюхьярви и ряд других пограничных озер и рек, находящихся на водосборе Балтийского и Белого морей, имеющих большое значение для устойчивого экономического развития указанных стран. Россия имеет трансграничные водные объекты с 14 соседними государствами, в процессе совместного использования которых возникает множество разнообразных проблем, имеющих как природоохранное, так и политическое значение.

Эффективное решение этих проблем зависит от профессиональной подготовки будущих специалистов, начиная с первых курсов высших учебных заведений. Именно этот ключевой момент требует активного целенаправленного сотрудничества науки и высшего образования, с учетом международного аспекта проблемы.

Важной задачей высококвалифицированных специалистов является выработка совместных подходов по многофункциональному использованию трансграничных водоемов, в том числе как объектов энергетики, источников водоснабжения, резервуаров приема сточных вод, мест для рекреации и др. В настоящее время особую озабоченность вызывает процесс восстановления водных систем. В связи с этим вопросы интеркалибрации методов определения параметров качества поверхностных и подземных вод, методик проведения мониторинга, прогнозирования и охраны трансграничных водных систем в рамках законодательства Российской Федерации (Водный кодекс РФ от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ) и стран Европейского Союза (Рамочная водная Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза No. 2000/60/ЕС от 23 октября 2000 г.) становятся особенно актуальными.

Управление водными и другими ресурсами трансграничных водных объектов должно быть основано на скоординированных действиях, обеспечивающих максимум взаимных экономических выгод, не наносящих при этом ущерба экосистемам, и основанных на современных инновационных подходах для решения региональных, национальных, международных задач. Освоение с последующим внедрением современных управленческих решений на базе инновационных технологий возможно при высоком образовательном уровне молодых специалистов, который достигается при постоянном диалоге науки и образования, обмене опытом на семинарах, школах и конференциях, при проведении совместных экспедиций и полевых практик.

Международная школа-конференция проходила в Петрозаводске 11–13 ноября 2014 г. на базе горно-геологического факультета ПетрГУ. В ней участвовали научные и образовательные учреждения Республики Карелия, такие как ИВПС КарНЦ РАН и НОЦ ИВПС КарНЦ РАН «Водные объекты Карелии и методы их исследования», Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), Институт геологии КарНЦ РАН, Отделение РГО в Республике Карелия, ведущие научные и образовательные организации России, такие как МГУ им. Ломоносова, Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург), Российский государственный педагогический университет им. Герцена (Санкт-Петербург), Институт водных проблем РАН (Москва), Институт озераведения (Санкт-Петербург), Институт океанологии РАН (Москва), совместно с коллегами из университетов соседних европейских стран, имеющих общие трансграничные объекты с Россией, таких как Университет г. Хельсинки (Финляндия) и Университет г. Тарту (Эстония).

Международная школа-конференция «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии» является продолжением начатого в 2007 г. сотрудничества, в рамках которого проводились совместные совещания, школы, экспедиции.

В 2014 г. Международная школа-конференция проводилась при поддержке Федерального агентства научных организаций РФ (ФАНО), проекта ПСР ПетрГУ «Совершенствование деятельности

в области преподавания географии в вузе и в школе на основе внедрения новых информационных технологий», а также в рамках проектов РНФ «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» и «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние». В рамках этих проектов РНФ были заслушаны доклады руководителей проектов чл.-корр. РАН Н. Н. Филатова и д. г. н. Д. А. Субетто. С лекциями по широкому спектру проблем озер, морей, водосборов, трансграничных водоемов выступили ведущие специалисты океанологи, гидрологи, климатологи, лимнологи, биологи, гидрохимики, геофизики, а также аспиранты и студенты из указанных выше институтов и университетов. Была организована работа круглых столов по актуальным проблемам наук о Земле и организованы экскурсии.

Цель школы-конференции – подготовка талантливой молодежи для работы в сфере науки и образования в тесном сотрудничестве с отечественными и зарубежными учреждениями высшего образования и научными институтами. В работе приняло участие около 100 человек, из них 70 студентов и аспирантов, молодых ученых.

Международный компонент мероприятия был представлен как непосредственным участием коллег из Эстонии, так и презентацией профессора университета г. Хельсинки в режиме удаленного доступа через Интернет с использованием программного обеспечения Skype.

Программа мероприятия включала два крупных теоретических раздела: I день – **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИМНОЛОГИИ И ОКЕАНОЛОГИИ** и II день – **ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ, ПАЛЕОКЛИМАТОЛОГИЯ, ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, КЛИМАТ**, в каждом из которых было представлено по 7–8 пленарных докладов/лекций ведущих ученых и по 7–8 презентаций аспирантов и молодых ученых.

Проведены два заседания в формате «Научный клуб» со свободными дискуссиями на темы: 1 заседание «Молодые ученые – проблемы и перспективы» (защита дипломов и диссертаций, подготовка публикаций) и 2 заседание «Дружба науки и высшего образования» (проведение практик и подготовка учебных материалов).

В завершение программы школы-конференции был представлен день «Научных экскурсий по интересам»:

- водоочистные сооружения Петрозаводских коммунальных сетей (ПКС),
- метеостанция Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»),
- вычислительный кластер ИПМИ КарНЦ РАН.

Все экскурсии проведены с большим познавательным эффектом, в том числе с учетом профориентационных возможностей выпускников географов, геофизиков, геологов ПетрГУ.

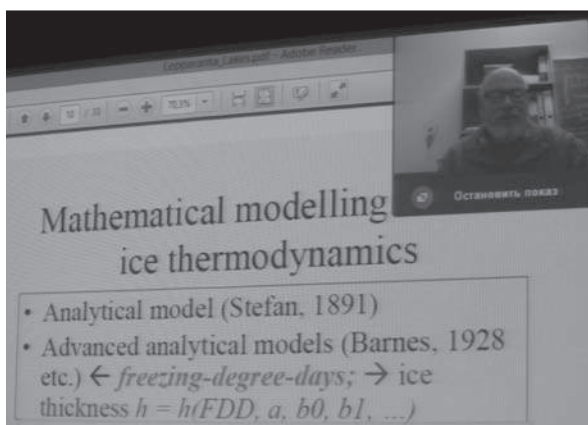
Можем с удовлетворением отметить, что прошедшая школа-конференция способствовала продолжению постоянного диалога и сотрудничества между всеми заинтересованными сторонами для решения возникающих проблем трансграничных вод. Совершенно очевидно, что, как отмечал 7-й Генеральный секретарь Организации Объединенных Наций (1997–2006) Кофи Аннан, водные проблемы могут быть не только причиной напряженности, но также и катализатором сотрудничества.

ИВПС КарНЦ и ПетрГУ выражают благодарность Компании «Петрозаводские коммунальные системы», Карельскому центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Институту прикладных математических исследований КарНЦ РАН за проведенные экскурсии для участников мероприятия, а также горно-геологическому факультету ПетрГУ, на базе которого в течение двух дней были заслушаны доклады и организованы дискуссии школы-семинара.

Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд

Часть 1

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИМНОЛОГИИ И ОКЕАНОЛОГИИ



О НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМАХ НАУК О ЗЕМЛЕ. НА ПРИМЕРЕ ЛИМНОЛОГИИ

Н. Н. Филатов

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Петрозаводский государственный университет*

Представленный материал может быть использован при подготовке лекций для студентов географических специальностей вузов и при изучении курса географии в общеобразовательных школах. В данной лекции рассмотрим в основном проблемы водных ресурсов.

Россия является одной из наиболее богатых ресурсами стран мира. Территория, занимаемая Россией, составляет более 17 млн км², относится к бассейнам 12 морей, 3 океанов. Разнообразие природно-климатических условий России, расположенной в арктическом, субарктическом, умеренном и частично в субтропическом климатических поясах, которые включают зону арктических пустынь, тундры, лесотундры, таежных лесов, смешанных лесов, лесостепи, степи, полупустыни, определяет разнообразие озер.

Состояние с обеспечением населения планеты пресной водой в будущем будет только ухудшаться, если, конечно, не будут приняты меры по изменению всей системы водопользования (The Skeptical Environmentalist, 2002). В работе В. И. Данилова-Данильяна (2009) приводится прогноз, составленный известным гидрологом Дж. Роддом (1987). Согласно этому прогнозу где-то между 2035 и 2045 гг. объем потребления пресной воды приблизится к ее экономически доступным запасам (рис. 1). В работе (Данилов-Данильян, 2009) уточняется, что это может наступить даже раньше, к 2025 г., если сохранятся темпы роста потребления пресной воды и темпы снижения экономически доступных водных ресурсов вследствие загрязнения. Эти экстраполяционные прогнозы не следует принимать безоговорочно, однако они служат серьезным предупреждением.



Рис. 1. Прогнозы роста глобального водопотребления (Данилов-Данильян, 2009)

Причины такого развития ситуации с пресной водой на планете хорошо известны: рост потребления связан с ростом населения, ростом экономики и, в частности, ростом потребностей сельского хозяйства, а сокращение запасов воды связано с ростом антропогенной нагрузки на водные объекты, сведением лесов, осушением болот. При этом, хотя бытовое водопотребление не составляет основной части общего водопотребления, его рост весьма значителен (рис. 2).

Водные ресурсы играют важнейшую роль в обеспечении устойчивого социально-экономического развития. Состояние здоровья населения, развитие экономики стран в значительной степени зависят от наличия и качества водных ресурсов, их комплексного рационального использования и охраны (Водные ресурсы..., 2008). Россия является одной из наиболее обеспеченных водными ресурсами стран, располагая более чем 20 % мировых запасов пресных поверхностных и подземных вод. Среднегодовые ресурсы речного стока России составляют 4262 км³ в год (10 % объема

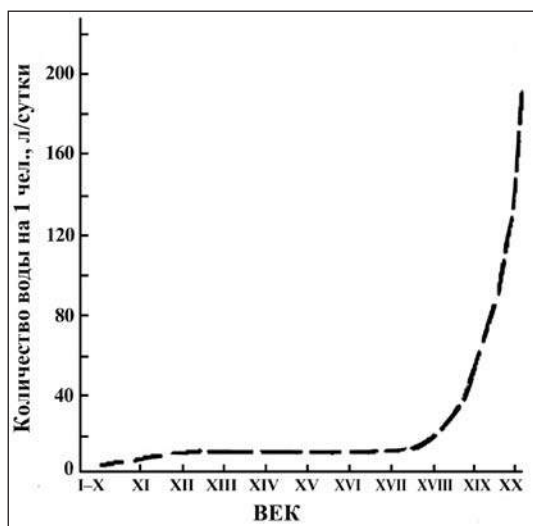


Рис. 2. Рост бытового потребления воды за последние 2000 лет
(Данилов-Данильян, 2009)

мирового речного стока), из которых около 90 % приходится на бассейны Северного Ледовитого и Тихого океанов и менее 8 % – на бассейны Атлантического океана и Каспийского моря. На одного жителя страны приходится около 30 тыс. м³ воды в год, или 78 м³ в сутки (второе место в мире после Бразилии). Прогнозные эксплуатационные запасы подземных вод составляют свыше 360 км³ в год (Водные ресурсы..., 2008). Поскольку открытые водные источники значительно подвержены антропогенному воздействию, в мире все больше используют подземные воды, более защищенные от загрязнения.

В последние 20–30 лет заметно обострились проблемы, связанные с противоречиями между растущими потребностями человечества и имеющимися природными ресурсами. К числу таких проблем относится проблема загрязнения вод человеком и обеспечение населения питьевой водой полноценного качества. Глобальные масштабы этой проблемы в полной мере были обозначены в 1977 г. на Конференции ООН по водным ресурсам,

а в 2003 г. – на Всемирном водном форуме. Анализ ситуации, сложившейся во многих странах мира и характеризующейся количественным и качественным дефицитом питьевой воды, ростом и масштабами заболеваемости населения, связанными с негативным влиянием водного фактора, явился причиной провозглашения 80-х годов Десятилетием питьевой воды и санитарии. Недостаток в пресной воде отмечается на территории, составляющей около 60 % всей площади суши Земли. Во многих районах водный фактор начинает сдерживать развитие промышленности и сельского хозяйства.

По данным Всемирной организации здравоохранения, примерно 1,2 млрд человек страдают от нехватки питьевой воды. Особую озабоченность вызывают факты ухудшения гигиенических показателей питьевой воды, что отрицательно сказывается на состоянии здоровья значительных по численности групп населения в ряде развивающихся и некоторых развитых государств и требует поэтому срочных и решительных мер для исправления создавшегося положения. Многие страны, такие как Израиль, Гонконг и ряд других, полностью используют для своих целей водные ресурсы других государств. Возникли проблемы в Крыму, из-за того что Украина ограничила поставку воды. Хорошая вода уже стала предметом экспорта. Чистые глубинные воды озера Байкал продаются в Германию и Японию. Гонконг получает воду по специальным трубопроводам из Китая, а в засушливые годы вода доставляется сюда танкерами. Рядом стран рассматриваются проекты закупки пресной воды, например, крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского.

За последние 50 лет поверхностные воды подвергаются очень серьезному влиянию человека. Многие реки и озера загрязнены настолько, что их воду не только нельзя пить, но в них даже нельзя купаться. Можно вспомнить «умирающие» когда-то Великие Американские озера или загрязнение р. Рейн в Германии. Когда были осознаны масштабы и серьезность проблемы загрязнения водных объектов, были предприняты беспрецедентные меры по их спасению. В настоящее время за счет таких мер восстанавливается статус и качество вод озер Эри и Онтарио в Северной Америке. Восстанавливаются воды р. Рейн, в которую вернулось около 70 видов рыб, чище стали американские озера. Предпринимаются серьезные меры по восстановлению качества вод р. Дунай, которая используется многими европейскими странами. Серьезные проблемы имеются по совместному использованию р. Амур Россией и Китаем.

Водный фонд Российской Федерации и его ресурсы являются национальным достоянием страны. Восстановление и их сохранение в экологически благоприятном состоянии должны являться стратегическим направлением государственной водохозяйственной политики (Из справки МПР РФ, представленной Федеральному собранию страны, 2002 г.). Располагая столь значительными ресурсами и используя не более 3 % речного стока ежегодно, Россия в целом ряде регионов испытывает острый дефицит в воде, обусловленный неравномерным их распределением по территории (на наи-

более развитые и заселенные центральные и южные районы европейской части России, где сосредоточено 80 % населения и промышленного потенциала, приходится лишь около 8 % ресурсов), а также низким качеством вод, в особенности поверхностных. Загрязнение водных объектов – источников питьевого водоснабжения при недостаточной барьерной роли действующих водоочистных сооружений резко обострило проблему водообеспечения многих регионов России питьевой водой и создает серьезную опасность для здоровья населения, обуславливает высокий уровень заболеваемости кишечными инфекциями, гепатитом, повышает степень риска воздействия на организм человека различных факторов.

Трансграничные воды

Взаимный обмен водами происходит у России с 14 государствами. Многие трансграничные воды – проблемные (перенос загрязнений, регулирование водного стока), имеются проблемы, разногласия по использованию водных ресурсов с Украиной, Казахстаном, Китаем.

Лучше ситуация с нашими трансграничными водными объектами с такими соседями России, как Финляндия и Эстония. Специфика конкретных условий загрязнений, использования вод – в сложности оценки состояния, различиях в технологиях, культуре использования и др. Поэтому регулирование с разными странами требует индивидуального подхода при заключении соглашений. Международные правовые документы для решения проблем трансграничных вод пока отработаны нечетко. Проблема гармонизации подходов к исследованию, оценке состояния, совместного использования и охраны трансграничных водоемов, их водосборов России и стран ЕС (Финляндии, Эстонии) является чрезвычайно актуальной. Такие водные объекты, как Ладожское и Онежское озера, Псковско-Чудское озеро и ряд других пограничных озер, находящихся на водосборе Балтийского и Белого морей, имеют большое значение в экономике указанных стран. Важным является выработка совместных подходов по интеркалибрации методов оценки параметров качества поверхностных и подземных вод, по методам мониторинга, прогнозирования, охраны трансграничных водных и наземных систем в рамках законодательства Российской Федерации (Водный кодекс) и Европейской водной директивы (FWD).

Россия имеет очень хорошо развитую гидрографическую сеть, относящуюся к бассейнам трех океанов (Тихого, Атлантического и Северного Ледовитого) и Каспийского моря (озера). Длина морской береговой линии составляет около 60 тыс. км. Территорию страны омывает 13 морей (включая Каспийское). Общая площадь морской акватории, попадающая под юрисдикцию Российской Федерации (РФ), составляет 7 тыс. км² (Водные ресурсы..., 2008). Суммарные водные ресурсы и запасы вод России приведены в табл. 1.

Таблица 1

Суммарные ресурсы и запасы воды на территории Российской Федерации

Водоисточник	Естественные ресурсы, км ³ /год	Статические (вековые) запасы, км ³
Реки	4270,6	470
Озера	530	26 500
Ледники	110	15 148
Подземный лед	–	15 800
Болота	1000	3000
Почвенные воды	3500	–
Подземные воды	787,5	28 000
Всего	7770,6	88 918

Примечание. По: Водные ресурсы..., 2008.

Наиболее значимыми для водного хозяйства являются пресные воды рек, озер и подземных горизонтов.

ОЗЕРА. Общее число пресных и соленых озер, расположенных на территории РФ, составляет свыше 2,7 млн. Суммарная площадь их акватории равна 408 856 км², объем воды в пресных водоемах – 26,5 тыс. км³. Однако площадь свыше 1000 км² имеют только 19 водоемов. Около 98 % озер имеют площадь менее 1 км² и глубину до 1,5 м, поэтому основная часть пресной воды (более 24 тыс. км³) сосредоточена в 7 крупнейших водоемах (табл. 2) (Водные ресурсы..., 2008).

Таблица 2

Основные характеристики крупных пресных озер Российской Федерации

Озеро	Площадь зеркала, тыс. км ²	Глубина, м		Объем воды, км ³
		средняя	максимальная	
Байкал	31,5	730	1741	23 000
Ладожское	17,7	51	(230)	908
Онежское	9,7	(30)	(120)	(295)
Таймыр	4,6	2,8	26	13
Ханка	3,9–5,0	4	11	16,5
Чудское и Псковское	3,6	7,1	15	25,2
Белое	1,3		20	5,2

Примечание. По: Водные ресурсы..., 2008; в скобках приведены данные из других источников.

По территории России озера распределены очень неравномерно. Основная их часть расположена на Северо-Западе (Карелия, Кольский полуостров), Урале, в Западной Сибири, на Ленско-Вилуйской возвышенности, в Забайкалье и бассейне р. Амур (Водные ресурсы..., 2008) (рис. 3).

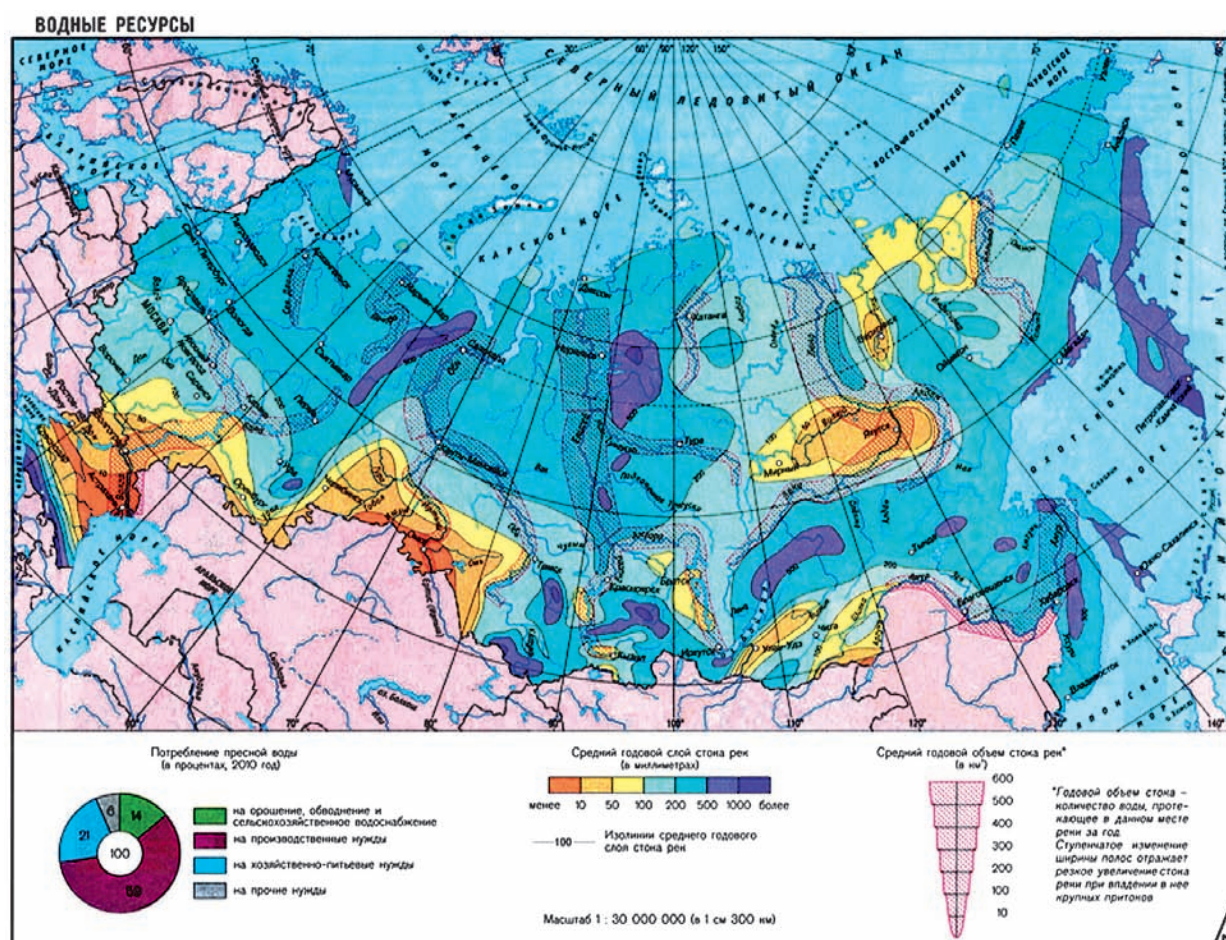


Рис. 3. Водные ресурсы России (www.worldgeo.ru/russi/mapped)

Озерные воды в основном относятся к категории вековых (статических) водных ресурсов, поэтому их интенсивное использование может привести к негативным экологическим последствиям. Допускается использование только динамических, ежегодно возобновляющихся ресурсов, но их объем для крупных озер составляет в среднем только 1,5–2 % от общего.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ. Широко, но неравномерно распространены по всей территории страны. Активно используются в водном хозяйстве (в первую очередь, для питьевого водоснабжения), но интенсивность их использования по сравнению с поверхностными в настоящее время гораздо ниже.

Подземные воды также являются важным источником питания рек, особенно в меженные (маловодные) периоды.

Согласно оценкам, прогнозные ресурсы подземных вод составляют 316,75 км³/год, из них 157,98 формируется за счет поверхностных. Разведанные эксплуатационные запасы равны 32,36 км³/год (Водные ресурсы..., 2008).

По состоянию на 2002 г. в РФ разведано 4483 месторождения подземных вод, но эксплуатируются из них только 1990. Общий объем разведанных эксплуатационных запасов составляет 89,4 млн м³/сут, в том числе подготовленных для промышленного освоения – 80,4. Общая добыча подземных вод составляет 28,15 млн м³/сут, из них на участках с разведанными запасами – 15,32, на неутвержденных запасах – 12,83 млн м³/сут (Водные ресурсы..., 2008).

РЕКИ. Основным видом водных ресурсов для большинства районов России является динамичный, ежегодно возобновляющийся речной сток. По его годовому объему РФ занимает второе после Бразилии место в мире.

На территории страны насчитывается 2 562 489 рек суммарной протяженностью 8 373 606 км. Из этого числа 214 рек (0,008 %) имеют длину более 1000 км, а около 95 % – менее 25. Пять рек имеют площадь водосбора более 1 млн км² (Водные ресурсы..., 2008) (табл. 3).

Таблица 3

Наиболее крупные реки Российской Федерации

Река	Площадь бассейна, тыс. км ²	Длина, км	Среднегодовое		Сток маловодного года, км ³
			сток, км ³	расход, м ³ /с	
Обь	2975	4345	403	12 830	282
Амур	2050	2850	403	12 830	209
Лена	2478	4270	489	15 500	424
Енисей	2580	3490	585	18 600	528
Волга	1360	3530	238	7960	182

Примечание. По: Водные ресурсы..., 2008.

Несмотря на высокую водообеспеченность речным стоком, при его использовании часто возникают значительные сложности. Они связаны с его большой временной и пространственной изменчивостью. Речная сеть распределена по территории очень неравномерно. Наибольшая густота характерна для северных и горных районов, наименьшая – для южных. Соответственно, большая часть речного стока сосредоточена в малонаселенных и слабоосвоенных районах Европейского Севера, Сибири и Дальнего Востока, в то время как в южных регионах часто возникают существенные проблемы с обеспечением водой отраслей экономики и населения.

В результате предпринятых мер, а также падения производства в РФ замедлился процесс антропогенного эвтрофирования и загрязнения крупнейших пресноводных озер Европы – Онежского и Ладожского, а также оз. Байкал.

Важнейшей задачей при использовании водных ресурсов суши является снижение антропогенного пресса. В этой связи можно выделить следующие фундаментальные проблемы: проблему сохранения водных экологических систем и проблему определения допустимых пределов антропогенной нагрузки на водные объекты.

Пресноводные озера, несмотря на то что их доля в общих запасах пресной воды на планете очень мала – менее половины процента (Данилов-Данильян, 2009), играют исключительно важную роль в обеспечении населения питьевой водой. Так, только на территории водосборных бассейнов больших стратифицированных озер, расположенных в умеренных широтах северного полушария, проживают многие миллионы людей. Судьба великих озер, естественно, находится в центре внимания ученых многих стран, поскольку именно крупнейшие озерные системы мира, расположенные в индустриально развитых и густонаселенных районах Европы и Северной Америки, подверглись наибольшей опасности загрязнения и антропогенного эвтрофирования.

В последние десятилетия во многих странах стало очевидным, что одним из важнейших видов водных ресурсов, которые можно использовать для питьевых целей, являются подземные воды. Про них гидрогеологи говорят, что это полезное ископаемое номер один. Главная особенность подземных

вод – их защищенность от непосредственного воздействия загрязнений, возобновляемость в процессе общего круговорота воды, что коренным образом отличает подземные воды от всех других полезных ископаемых. Кроме того, при эксплуатации подземных вод происходит не только расходование, но во многих случаях и дополнительное формирование, вызванное усилением питания подземных вод поверхностными, а также за счет уменьшения испарения с поверхности грунтовых вод. Другая существенная особенность подземных вод – их подвижность и тесная взаимосвязь с окружающей средой. Несмотря на значительно меньшие объемы по сравнению с поверхностными (всего 0,27 % от объема всей гидросферы), подземные воды занимают значительное место в обеспечении потребностей человека в воде. При этом возникает достаточно много проблем не только поиска и обеспечения населения этой водой, но и правильного обоснования того объема воды, который можно взять из водоносного горизонта в течение расчетного периода без ущерба для подземных вод и окружающей среды.

Несмотря на обилие водных ресурсов в Карелии, как и в России в целом, имеются серьезные проблемы с водоснабжением и состоянием здоровья населения из-за некачественной питьевой воды. По некоторым оценкам организаций здравоохранения от 30 до 80 % болезней в той или иной степени связаны с некачественной водой. Учитывая серьезные проблемы с обеспечением населения питьевой водой, Правительство России в 1998 г. подготовило долгосрочную программу. На основе этой программы в 1999 г. была разработана такая же программа и для Республики Карелия. Однако, несмотря на принимаемые меры по программе, уже в июле 2000 г. в связи с неблагоприятным положением с развитием питьевого водоснабжения, которое создает угрозу национальной безопасности России, Госдума РФ приняла постановление о проблемах питьевой воды и питьевого водоснабжения в Российской Федерации.

По оценкам (Filatov, Gronskaja, 2012) в России около 2,8 млн озер. В России расположено самое глубокое озеро – Байкал (1741 м) и крупнейшие озера Европы – Ладожское и Онежское и частично находится крупнейшее озеро мира – Каспийское море (площадь зеркала 371 000 км² без залива Кара-Богаз-Гол).

Современная классификация территории России по озерным районам была сделана с использованием ранее выполненных исследований А. А. Соколова, Л. П. Доманицкого, а также материалов, опубликованных в работах Т. П. Гронской (Водные ресурсы..., 2008; Filatov, Gronskaja, 2012). В настоящее время определение числа озер, площади озер, других параметров, выделение озерных регионов проводится с помощью геоинформационных методов. Среди баз данных об озерах, полученных таким образом, упомянем ILEC (<http://wldb.ilec.or.jp>), WORLDLAKE (Рянжин, 2008). Последняя база данных об озерах Мира создана по данным цифровых карт и космической информации, состоит из трех уровней, которые построены по картам разных масштабов. Работу по уточнению числа озер, их площади, объемов вод, озерности для озер РФ с использованием ГИС технологий по цифровым картам крупного масштаба еще предстоит выполнить в рамках как создания реестра озер России, так и создания таких реестров для отдельных озерных регионов РФ; для ряда регионов такая работа проведена (Каталог..., 2001; Рянжин, 2008).

Были выделены следующие озерные районы для Европейской территории: Северо-Западный, Северный, Центральный, Прикаспийский и Азово-Черноморский, Каспийский; для Азиатской территории: Западно-Сибирский, Северо-Сибирский, Забайкальский, Амурский, Камчатский и Озера островов Северного Ледовитого и Тихого океанов.

В табл. 4 приведено распределение озер для Европейской и Азиатской частей России площадью более 1 км².

Таблица 4

Озера России по градациям площади зеркала

Площадь зеркала, км ²	Количество озер			Суммарная площадь зеркала, км ²
	ЕТР	АТР	Российская Федерация в целом	
1–10	4830	28 370	33 200	76 940
10–50	429	1274	1703	32 790
50–100	38	125	163	11 163
100–1000	20	69	89	20 924
>1000	4	4	8	74 020
Всего	5321	29 842	35 163	215 837

Размещены озера по территории страны крайне неравномерно. Около 96 % всех запасов озерных вод страны сосредоточено в восьми крупнейших озерах России площадью более 1000 км², только 19 озер имеют площадь зеркала, превышающую 1000 км², их суммарная площадь акватории 108 065 км².

О роли науки и образования

На протяжении всей своей истории человечество пережило не один экологический кризис, за «победу» над которыми пришлось заплатить огромную цену. В связи с этим возрастает роль науки, задача которой – предвидеть возможные катаклизмы и благодаря изменению технологий, образ жизни создавать новые условия для нормального существования человека (Филатов, 2001). Альтернативой печальному сценарию развития цивилизации должно быть разумное развитие общества в планетарном масштабе и создание ноосферы, учение о которой разработал замечательный русский ученый, философ Владимир Иванович Вернадский (1944). Критерием национального и индивидуального богатства должны стать в первую очередь духовные ценности и знания людей, живущих в гармонии с природой. С начала XXI в. человечество стоит перед беспрецедентной проблемой выбора стратегии своего выживания. Стратегия касается всех сфер жизнедеятельности – экономики, науки, образования, культуры, формирования нравственности. Ярким свидетельством отнюдь не устойчивого развития цивилизации на современном этапе является современный глобальный экономический кризис. Концепция устойчивого развития исходит из того, что экономическое развитие преимущественно за счет природной среды или в ущерб ей недопустимо; чрезвычайное обогащение одних путем ограбления других на международном уровне и внутри стран чревато угрожающим цивилизации глобальным социальным взрывом; потребление, как промышленное, так и личное, с учетом ограниченности ресурсов планеты должно быть разумно рационализировано (Коптюг, 1996). Говоря об устойчивом развитии, адаптации биосферы и человека к ноосфере, сегодняшние прогрессивные политические и духовные лидеры приходят к выводу о необходимости новой концепции XXI в. Основанная на научном знании, она должна учитывать национальные традиции и культуру, состояние экономики и государственные интересы, но в основу ее, конечно, будут заложены общие принципы хозяйствования и жизни, учитывающие интересы стран и человечества в целом, формирование геополитических полюсов с довольно разными системами жизненных ценностей. Между такими полюсами и странами, объединяющимися в рамках каждого полюса, неизбежно неравенство стартовых потенциальных возможностей перехода на путь устойчивого развития. Наивно было бы полагать, что движение человечества к устойчивому развитию будет далее бесконфликтным. Напротив, ближайшие десятилетия – это период острейшей борьбы на мировой арене за ресурсы и в первую очередь сегодня – за углеводородное топливо. Пример – Ирак, а в последние годы – Ливия, Египет, Сирия, возможно, и Иран, судя по высказываниям некоторых деятелей США. В ближайшие годы обострится борьба за воду и экологический резерв (Киотский протокол) и интеллектуальный потенциал (приток научных сил из многих стран, в том числе и России, в США). Поэтому важно понимать мировые тенденции развития процесса глобализации, которые помогут России определить стратегию развития, национальные интересы и возможности формирования более устойчивого многополюсного мира (Скрипник, 2000). Как пишет В. И. Скрипник, «в процессе глобализации все меньшее влияние играют национальные государства в своих границах, все большей глобализации подвергаются ресурсы. Потребность в новой концепции развития человечества назрела давно, так как для нынешнего сугубо рационального подхода к основополагающим проблемам бытия, насильственно насаждаемого во многих странах, характерно уничижительное отношение к другим культурам, религиям, отрицание ценности традиций природопользования, выработанных разными цивилизациями. Основное беспокойство вызывает внедряемый ныне повсеместно так называемый „экономизм“». Ничем не ограниченный экономизм, спекуляции на биржах, валютном рынке и привели к современному экономическому кризису в мире. При всей своей притягательной силе «экономизм» грешит вульгарным, примитивным отношением ко многим вещам. По мнению известного русского философа С. Н. Булгакова, «экономизм» утверждает хозяйственную природу всей культуры, творчества, ищет хозяйственные подосновы в высших духовных проявлениях жизни. В мире начинают осознавать опасность такого пути. В особенности это стало очевидным после экономического кризиса, который продолжается до сих пор. На усиление регулирующей роли

государства в банковской сфере обращали внимание на разных экономических и политических форумах в 2009 г. многие ведущие лидеры разных стран. Серьезной угрозой цивилизации представляются попытки всеобъемлющего технократического использования окружающей среды. В сочетании с весьма распространенной идеей акционирования они ведут к еще большему упрочению привилегированных групп (олигархов) и корпораций, претендующих на обладание особым знанием и экономическими ресурсами стран. При таком раскладе можно с уверенностью предсказать наступление эпохи нового тоталитаризма, упакованного в глобализацию.

Как же направить ситуацию в интересах народов России? Выход видится один: продолжить работу над государственной программой развития страны, в которой приоритеты будут отданы науке, развитию технологий, собственной промышленности и образованию, а также воспитанию нравственности и духовности.

Таким образом, подчеркнем, что устойчивое развитие государства будет определяться в первую очередь уровнем развития науки и образования.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова роль водных ресурсов в экономическом развитии разных стран?
2. Каков Ваш прогноз обеспечения населения регионов планеты пресной водой? Назовите типы антропогенного воздействия на водные объекты.
3. Приведите примеры трансграничных вод для разных стран Мира.
4. Объясните преимущества и недостатки использования поверхностных и подземных вод для питьевого водоснабжения в странах с разными природно-климатическими условиями.

Литература

- Вернадский В. И. Несколько слов о биосфере // Успехи современной биологии. 1944. № 18 (2). С. 113–120.
- Водные ресурсы России и их использование / Ред. И. А. Шикломанов. СПб., 2008. 598 с.
- Данилов-Данильян В. И. Водные ресурсы – стратегический фактор развития экономики России // Вестник РАН. 2009. Т. 79, № 9. С. 789–796.
- Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
- Коптюг В. А. Устойчивое развитие цивилизации и место в ней России. 1996 г.
- Родд Дж. К. Грани гидрологии: Перевод с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 536 с.
- Рянжин С. В. Много ли озер в России // Природа. 2008. № 4. С. 18–25.
- Скрипник В. И. Россия в XX веке. М.: ВИНТИ, 2000. 43 с.
- Филатов Н. Н. Устойчивое развитие России – Миф или реальность? // Север. 2001. № 5–6. С. 13–19.
- Filatov N., Gronskaya T. Lakes of Russia // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Eds. L. Bengtsson, R. W. Herschy, R. W. Fairbridge. Springer Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 2012. P. 674–679.
- The Skeptical Environmentalist. Bjorn Lomborg. Cambridge Univ. press, 2002. 600 p.
- www.worldgeo.ru/russi/mapped.
- <http://wldb.ilec.or.jp>.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКЕАНОЛОГИИ

К. В. Показеев

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова;
ГОИН им. Н. Н. Зубова*

Тема доклада, конечно, чрезвычайно широка, трудно охватить все разнородные и взаимосвязанные проблемы Мирового океана. Ведь современная океанология – это комплекс наук: физики, химии, геологии, биологии океана, и попытка определить актуальность тематики исследований является чрезвычайно сложной задачей. Исследование и освоение океана тесно связаны и взаимообуслов-

лены, разделить исследования и освоение необычайно трудно. И еще существенный аспект темы доклада – недолговечность и относительность актуальности проблем. Новые открытия меняют направления и исследований, и освоения и выбор перспектив.

Напомню о важнейших открытиях в океанологии последнего полувека, которые коренным образом изменили представления о Мировом океане.

Это открытие:

- вертикальной микроструктуры океана,
- синоптических вихрей океана,
- спрединга и субдукции океанской литосферы,
- донных гидротерм с сульфидным рудообразованием
- и оазисами жизни без фотосинтеза.

Значимым явилось также открытие газогидратов – потенциальных источников энергии.

Такие открытия стали возможны только благодаря комплексности океанологических исследований. Они кардинально изменили представления о Мировом океане, геологических процессах и происхождении жизни на Земле.

Учитывая сказанное, попытаюсь остановиться на вопросах, которые мне наиболее интересны, близки и кажутся актуальными.

Мировой океан и моря формируют климат планеты, определяют места наиболее комфортного проживания человека, области размещения промышленных зон и заповедных территорий. Экономические факторы в сочетании с естественным стремлением человека «к морю» создают условия развития или деградации отдельных стран и целых континентов.

Мировой океан является основным источником кислорода на планете, он определяет баланс кислорода и углерода на Земле.

Прогресс в изучении и освоении Мирового океана определяется глубиной научных идей и объемом финансовых затрат. Эта зависимость от объема вложенных средств и усилий в океанологии выражена как ни в какой другой научной области.

Так было всегда – с античных времен и по настоящее время.

Человеческая деятельность в океане является наиболее яркой и эффектной формой демонстрации технических достижений, предопределяющих перспективы экономического развития отдельных стран, регионов и всего мирового сообщества.

Создание Португалией первого в мире инновационного центра «**Junta Mathematicus**» позволило в разоренной войной нищей стране создать первые примитивные навигационные инструменты и карты, научные основы которых разрабатывались международным сообществом ученых. В результате были открыты новые морские пути, освоены огромные территории, созданы способы доставки дорогих товаров (пряностей, драгоценных камней, слоновой кости) в Европу, и в исторически короткий срок Португалия вошла в ряд процветающих стран.

Соревнование на море Испании, Италии, Португалии привело к созданию новых надежных судов – каравелл. В результате в экономические отношения был вовлечен ранее изолированный огромный континент. Плодами этих трансконтинентальных связей (кукурузой, томатами, картофелем, подсолнечником и др.) сегодня пользуется каждый житель Земли.

Вложение Англией огромных средств (материальных и моральных) способствовало созданию нового класса надежных и комфортабельных судов, которые несколько столетий служили основой силы огромной империи. Понимание важности освоения океанических процессов нашло отражение в известных строках: «*Britain rules the waves...*».



Реплика «Пинты», каравеллы-редонды первого похода Христофора Колумба



«Катти Сарк» – легендарный чайный клипер. Единственное фото «Катти Сарк» на ходу. Снимок сделан капитаном Р. Вуджетом

В истории России также можно выделить несколько периодов выраженной морской активности – период правления императора Петра I и начало XIX в., когда корабли под российским флагом открывали Антарктиду, осваивали Камчатку, Аляску и Калифорнию.

Прогресс во второй половине XIX в. связан с именами профессора Д. И. Менделеева и адмирала С. О. Макарова.

Корвет «Витязь» под руководством Макарова настолько прославился в изучении Тихого океана, что удостоился чести быть указанным на фронтоне Океанографического музея Монако наряду с «Вегой» Норденшельда, «Фрамом» Фридьофа Нансена и другими великими в своих достижениях судами.

Факты высокой эффективности вложения сил и средств в изучение и освоение Океана имеют место и в наше время. Вложение колоссальных средств Англией и Норвегией в разработку углеводородов в Северном море позволили им в исторически короткий промежуток времени перейти из группы второразрядных в немногочисленный ряд процветающих стран.



Буровая установка. Стоимость крупнейших морских буровых установок в зависимости от типа и условий эксплуатации может достигать нескольких миллиардов долларов



Подобная авианосная ударная группа США стоит более 15 млрд \$ (авианосец – 5 млрд \$, 4–6 крейсеров и эсминцев по 1,0–1,5 млрд \$, 2 подводные лодки по 1–2 млрд \$ + 2–4 корабля сопровождения)

Кстати, гидрометеорологическое обеспечение движения такой группы – чем не актуальная океанологическая задача? Даже гидрометеорологическое обеспечение движения одной атомной подводной лодки (стоимостью в 1,5–2 млрд \$) – актуальная океанологическая задача. Как на снимке, авианосная ударная группа выглядит в спокойную погоду. А от удара аномальных морских волн повреждаются даже авианосцы.

Исследование аномальных волн (волн-убийц и т. п.) – актуальнейшая океанологическая задача. Хотя многие ведущие теоретики занимаются этой проблемой, она далека от разрешения. Каков механизм формирования аномальных волн? Можно ли предупредить возникновение аномальной волны? Можно зафиксировать ее возникновение и дать предупредительный сигнал? Необходимо определение районов, опасных с точки зрения появления аномальных волн.

Американский авианосец «Хорнет» (USS Hornet, CV-12) с полетной палубой, поврежденной тайфуном. 5 июня 1945 г.



В чем же причина такого огромного интереса к Мировому океану? Почему имеет смысл вкладывать средства не в Космос, не в изучение атмосферы и твердой Земли (пусть меня извинят геофизики, изучающие эти геосферы), а именно в Океан?

Океан является последним доступным резервом человечества, вложение в который интеллектуальных и экономических затрат позволит в реальные сроки обеспечить дальнейшее развитие человечества! Важнейшей причиной освоения именно Океана является то, что экономическую отдачу вложений в изучение и освоение Океана можно получить в кратчайшие сроки. А если вспомнить результаты работ, выполненных по заказу Римского клуба, или итоги международных форумов, посвященных проблемам устойчивого развития человечества, то следует сказать, что только интенсивное целенаправленное изучение и освоение Мирового океана позволит избежать гибели человечества.

Высокую эффективность вложений в исследование и освоение Океана подтверждает вся история. Вначале рост благополучия отдельных стран и регионов создавали географические открытия, обеспечивающие новые товары, расширение рынков труда и сбыта избыточной продукции. Затем стали эксплуатироваться биологические (рыба и морепродукты) и коммуникационные ресурсы (перевозки товаров и людей, передача информации с помощью подводных телеграфных, затем телефонных, а сейчас оптоволоконных кабелей). Далее стали извлекаться полезные ископаемые.

Выше утверждалось, что освоение Океана позволит решить проблему выживания человечества. Какая же проблема является главной? Катастрофические землетрясения или цунами? Или кометные атаки? Или эпидемии типа Эбола?

Есть проблема, и эта проблема стара, как и мир.

В мире есть царь: этот царь беспощаден,
Голод название ему.
Водит он армии; в море судами
Правит...

Николай Некрасов. Железная дорога

Согласно данным ООН, «голод продолжает расширяться год за годом, каждый день умирают 24 000 человек от голода, а по причинам, связанным с недостатком питания, их 100 000, что дает общее количество 35 миллионов смертей в год». Из них 10 000 детей. 800 миллионов недоедают и страдают от голода.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ФАО, доля сельскохозяйственных земель за последние 30 лет возросла с 33,13 до 35,71 % всей суши, а доля пашни – с 10,41 до 11,03 %, т. е. на доли процента. Площадь обрабатываемых земель за 1961–1990 гг. увеличилась с 1,3 до 1,4 млрд га. Практически произошла стабилизация площади пахотных земель и их урожайности. И, как следствие, стабилизировалось производство продуктов питания на душу населения.



Изменение площади сельскохозяйственных угодий в мире с 1950 по 1999 г.



Изменение производства зерна в мире с 1950 по 1999 г.

Рассмотрение экосистем суши и океана показывает, что биологические ресурсы океана далеко не исчерпаны.



Рост мирового производства рыбы (улов + разведение) во второй половине XX в.

В настоящее время все большее значение Океан приобретает как источник морепродуктов и нового генетического материала.

В 2030 г. 20 % животных белков, потребляемых человеком, будет получено в Океане.

Да, вылов рыбы достиг максимума и стабилизировался. Но дело в том, что следует принципиально изменить подход к использованию биоресурсов Мирового океана. Необходимо найти новые источники растительных и животных белков в океане.

Приучили россиян есть хот-доги и гамбургеры, суши и роллы, можно приучить и к крилю. Будет не менее вкусно и, во всяком случае, много полезнее.

А впереди:

- изучение экосистем геотермальных источников и создание искусственных экосистем, обладающих подобной производительностью;
- расширение числа видов аквакультур и их использование не только для производства продуктов питания, но для добычи минералов, решения экологических проблем;
- поиск новых видов морепродуктов;
- превращение морских рыбных стад в полностью контролируемые, регулируемые сообщества;
- создание на основе изучения экосистем гидротермальных источников безотходных технологий.

Добыча углеводородов в океане тоже напрямую связана с решением этой глобальной проблемы, поскольку сегодня производство сельхозпродуктов сильно зависит от объема энергозатрат в отрасли.

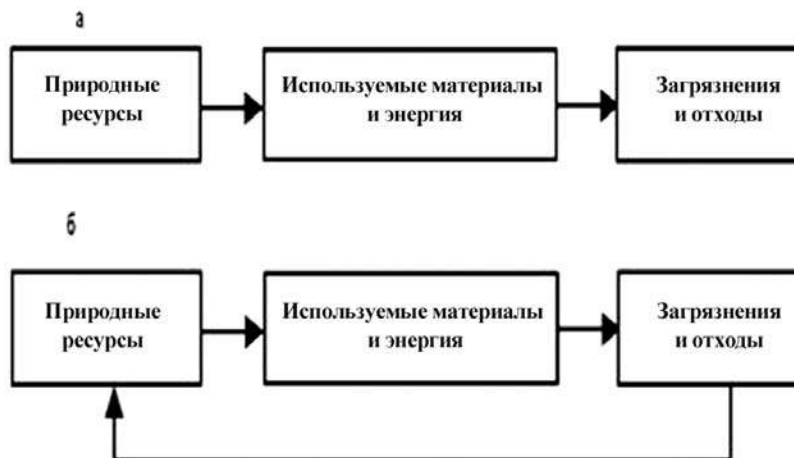
Граница суши и океана всегда была притягательной для проживания, доля населения прибрежных зон неуклонно растет. Согласно прогнозам, через четверть века более 70 % населения Земли будут проживать в прибрежной зоне.

В этой связи дальнейшее расширение океанологических исследований шельфа является актуальнейшей задачей.

Необходимость бесконфликтного дележа потенциальных богатств океана стимулировала развитие морского права, привела к созданию исключительных экономических зон, признанию глубо-

кого океана «всеобщим достоянием человечества» (что существенно дополняет старинный принцип «свободы мореходства»), к созданию «морских охраняемых территорий».

Схемы современных (а) и ноосферных (б) технологий



У человечества появляется шанс реализовать реальные безотходные технологии

Однако выясняется, что, вероятно, основные запасы углеводородов находятся на материковых склонах, в их глубоководной части. Материковые склоны, являющиеся границей двух типов плит, изучены еще очень плохо. Напомню, что около 75 % углеводородов сосредоточено на дне океана. Эти части морского дна часто выходят за пределы экономических зон...

Последствия очевидны.



Распределение зон экономических интересов в Арктике

Недавно министр иностранных дел Канады Джон Бэрд заявил: «Мы глубоко обеспокоены и мы стремимся поощрять и защищать суверенитет Канады в Арктике. Это является стратегическим приоритетом для нас. В связи с милитаризацией, которую мы видим, мы предпочитаем путь деэскалации конфликта, но ясно, что мы будем защищать наш суверенитет силой».

Здесь, наверное, уместно напомнить хорошо известную фразу М. В. Ломоносова: «Богатство России будет прирастать Сибирью и Северным Ледовитым океаном», которую обычно цитируют только наполовину. Обратите внимание: «...и Северным Ледовитым океаном». В течение нескольких веков Северный Ледовитый океан надежно прикрывал правый фланг России.

Россияне имеют громадный опыт успешного освоения Арктики. Еще Д. И. Менделеев и С. О. Макаров объединили свои усилия в привлечении общественного внимания к изучению Арктики. Выдвинутый ими лозунг «К Северному полюсу – напролом» стимулировал более чем столетние усилия по строительству судов ледового класса, которые были блестяще реализованы.

Северные моря, сохраняя свои рыболовные возможности, становятся все более значимым источником минерального сырья и энергоносителей. Освоение Севера требует координации усилий разных стран. Для практического освоения технологий жизни и работы на севере Норвегия открыла филиал международного университета на Шпицбергене, в котором обучаются и наши студенты.

Всестороннее изучение северных морей продолжает оставаться актуальнейшей задачей российских океанологов.

Направления научных исследований и направления освоения океана тесно связаны между собой. Например, в ФЦП «Мировой океан» Н. П. Лаверов выделял четыре направления:

- Геология дна, процессы осадконакопления, нефтегазоносность континентальных склонов внутренних и окраинных морей РФ;
- Геодинамика, морфология и состав земной коры и металлогения Мирового океана;
- Динамика экосистем, биохимические процессы в морях РФ и Мировом океане;
- Комплексные исследования и мониторинг арктических морей РФ: динамика вод, антропогенные воздействия, загрязнения и климатические изменения.

Очевидно, что это не просто направления научных исследований, это направления, реализация которых должна привести к прогнозируемым результатам освоения Океана.

Исследования в рамках ФЦП «Мировой океан»

- ориентированы на создание фундаментальной базы для экономически выгодного и рационального использования ресурсов океана,
- для обеспечения экономических и геополитических интересов России в Мировом океане,
- направлены на формирование новых концепций исследования океана, которые обеспечили бы приоритет страны на этом направлении в будущем.

Перейдем к прогнозу развития океанологических исследований в ближайшем будущем и, собственно, к актуальным проблемам исследования океана.



По-прежнему значительную роль в изучении океана будут играть НИС

Прежде всего, отметим, что океанология, как органичное и многолетнее объединение физики, химии, геологии, биологии океана, развиваемая на базе исследований, проводимых с помощью сложнейшей океанологической и космической техники, в обозримом будущем останется единой, так как все разделы взаимосвязаны и настолько сильно нуждаются друг в друге, что их обособление в ближайшее время не произойдет.

В ближайшие десятилетия дальнейшее развитие должна получить физика океана. Широкое развитие спутниковой океанологии неизбежно, это уже доказал опыт успешного применения ряда исследовательских спутников.

Физика океана

Необходимо создать единую спутниковую систему мониторинга всех надводных, подводных и воздушных судов, льдов, выходов внутренних волн, зон апвеллинга, поверхностных аномалий. Кажется, все это понимают. Создание такой системы, в частности, повысит безопасность плавания и полетов над океаном. Вспомним историю с пропажей малайзийского авиалайнера.

В видимом диапазоне света будут измеряться координаты цветности моря и отдельных спектральных линий, например, хлорофилла для оценок первичной продукции водорослей.

Спутниковые ИК-радиометры позволят регулярно измерять температуру поверхности моря. В принципе можно определять течения, высоты и скорости волн и приводного ветра. Эти измерения станут регулярными и покрывающими всю поверхность океана и гидросферы. По спутниковым данным будут оцениваться некоторые глубинные характеристики океана: апвеллинги, глубина пикноклина.

The diagram illustrates the GLONASS satellite navigation system. It features a central Earth globe with several orbital paths represented by colored lines (yellow, red, blue, purple). Key satellites and their details are labeled:

- АРКТИКА-М №1** and **АРКТИКА-М №2**: Polar-orbiting satellites.
- КАНОПУС-В №1** and **КАНОПУС-В №2**: Satellites in elliptical orbits with apogee at 40,000 km and perigee at 850 km.
- МЕТЕОР №1**, **МЕТЕОР №2**, and **МЕТЕОР №3 океанографический**: Medium Earth Orbit (MEO) satellites at 15,000 km.
- ЭЛЕКТРО-Л №1**, **ЭЛЕКТРО-Л №2**, and **ЭЛЕКТРО-Л №3 (14,5° с.д.)**: Low Earth Orbit (LEO) satellites at 14,5° latitude.
- АРКТИКА-Р №1** and **АРКТИКА-Р №2**: Polar-orbiting satellites.
- БКА**: A ground-based control station.

Orbital altitudes are marked: 40000 км, 850 км, 15000 км, 14500 км, and 500 км. Launch dates are provided for several satellites: МЕТЕОР №1 (17.09.2009), РЕСУРС-П (25.06.2013), КАНОПУС-В №1 (22.07.2012), ЭЛЕКТРО-Л №1 (20.01.2011), and КАНОПУС-В №2 (22.07.2012). A dashed line indicates the "геостационарная орбита" (geostationary orbit).

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СИСТЕМА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Высота, км

ОНОЛОЖЕМОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

ИОНОСФЕРА

ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА

СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА

ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ

ТРОПОСФЕРА

0, 12, 80, 300, км

Оптические радиодисканты Солнца

КВ нагрев. станции («Сура»)

Полном. информ. ИСЗ

Лидерное зондирование

СРБ и калибратор МГО

Станции ионосферного зондирования

Магнитные станции

Радиотомографические станции

Мол и СВЧ радиометры

Бро-регистраторы

Радиорешетки СДЛ, КВ

Аппаратура УФ, видимого и ИК диапазонов на геофизических КА

КА «Метеор»

Геостационарный КА «Электра»

КА «Монозонд»

КА ГЛОНАСС

ИО

Космические частицы

Высота в тропосфере зондирования: 0,300 км

Самолетное зондирование ПК-42Д, М-55 и др.

БАНКИ ДАННЫХ

МОДЕЛИ

ЦЕНТРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

ПОТРЕБИТЕЛИ

СТАТУС 2014

18 Ионосферных станций

22 Магнитные станции

65 Станции радиотомографической сети

20 Станций сети метеородиолокаторов

30 Станций сети мониторинга озона и УФ радиации

1 Станция ракетного зондирования

2 Информационно-аналитических центра

ЗАДАЧИ 2015

26 Ионосферных станций

24 Магнитные станции

185 Станций радиотомографической сети

72 Станций сети метеородиолокаторов

4 Станций сети мониторинга озона и УФ радиации

10 Информационно-аналитических центров

5 КА КВ «Изонзонд»

Вопрос о том, как, где, как часто должны проводиться измерения (в данном случае океанологические), для того чтобы получить адекватное описание реального природного процесса, является

важнейшим. Дать ответ на него не так-то просто. Необходимо иметь предварительное представление об основных характеристиках процесса, а для этого необходимо провести исследования – измерения.

В свое время были программы «Разрезы», «Вековые разрезы», в которых локализация измерений была аргументирована. Очевидно, что и в дальнейшем необходимо уделять большее внимание измерениям в энергоактивных зонах, зонах фронтальных разрезов и т. п.

Как охватить измерениями всю водную массу? И нужно ли это делать? Или можно ограничиться какими-то интегральными характеристиками? И как их установить, чтобы они адекватно описывали исследуемый процесс? Пока ответов на эти вопросы нет.

Важнейшей проблемой физики океана остается выяснение закономерностей взаимодействия океана и атмосферы, образующих основу для теории климата, долгосрочного прогноза погоды и океанской изменчивости.

Кажется, что этот вопрос еще сложнее, чем он представляется ныне. Дело в том, что существующие модели взаимодействия атмосферы и океана, возможно, учитывают не все формы их взаимодействия.

Вертикальная слоистость океана обнаруживается почти повсеместно, а о его горизонтальных неоднородностях с масштабами от километров до десятков и сотен километров пока что имеются лишь отрывочные данные, прежде всего у планктонологов. Необходимо изучать распространенность аномалий, их масштабы, амплитуды, времена жизни, гидродинамическую, гидроакустическую и биологическую роль.

Использование возможностей акустической томографии позволит получить новые результаты по фронтальной структуре океана, более точно установить локализацию водных масс.



Поверхностное проявление фронта в устье р. Кеми. Белое море

Дальнейшее развитие получают банки океанологической информации. Существующая система Международного Обмена Океанографическими Данными (МОООД) будет существенно усовершенствована. Базы будут содержать данные о рельефе дна, вертикальных гидрологических распределениях со все возрастающим вкладом измерений, полученных дрейфующими буями и бросаемыми батитермографами, течениях, явлениях на поверхности (волнение, льды, особые явления) и в некоторых банках – специальные данные (биогенные элементы, первичная продукция, характеристики промысловых стад рыб, загрязнений и т. п.).

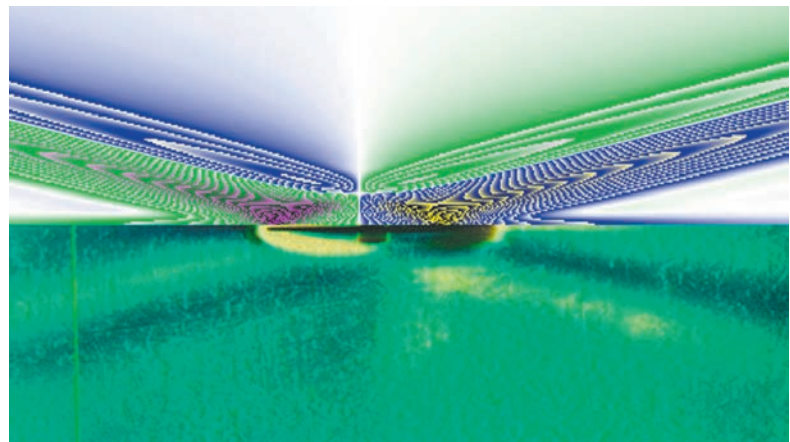
Будут разработаны методы решения полной системы уравнений термогидродинамики для атмосферы, морей и основных океанических акваторий, что позволит в конечном счете разработать совершенные методы прогноза состояния океана. Подчеркну именно решение полной системы уравнений с необходимыми граничными условиями, чем занимаются, например, в ИПМ РАН, что позволит получать не выбранный заранее тип решения, а все классы соответствующих решений. Подобный

подход развивается и в ряде западных научных центров. Лабораторные исследования даже простейших форм движения в стратифицированных средах, проводимые в ИПМ РАН, подтверждают обоснованность такого подхода.

В общем случае динамика гидродинамических систем определяется нелинейным взаимодействием всех структурных элементов течений, как регулярных – волновых, так и сингулярных – пограничных слоев. В силу больших значений завихренности взаимодействующие пограничные слои являются эффективными генераторами вихревых движений.

Экспериментальное исследование динамики пограничных слоев и порождения вихрей требует существенного совершенствования техники визуализации и измерения течений, которая должна разрешать тонкую структуру наиболее мелкомасштабных элементов течений. Прогноз эволюции природных систем должен проводиться с учетом геометрии внутренних пограничных течений, ограничивающих области существования волновых и вихревых систем и существенно влияющих на перенос энергии и вещества. Как в натурных, так и в лабораторных условиях аккумуляция и перенос вещества осуществляются преимущественно в высокоградиентных областях, типичных для внутренних пограничных течений.

Синтетическое изображение внутренних волн и пограничных течений:
сверху – расчет, снизу – теневое изображение пучка трехмерных внутренних волн около осциллирующего диска



Важной темой является исследование разного типа вихревых структур в океане. Подобные работы ведутся в ИПМ РАН, ИВП РАН, на физфаке МГУ и др.

Под руководством профессора В. Н. Зырянова развита теория топографических вихрей в океане, которая позволила не только описать динамику обнаруженных вихрей, но и теоретически предсказать новые вихревые структуры, такие как инверсные и линзовидные вихри, тороидальные вихри. Тороидальные вихри, или вихревые торы, над подводными горами – это недавно обнаруженное теоретически новое гидродинамическое явление, которое связано с бифуркацией кругового течения в топографических вихрях и генерацией вторичной завихренности. Именно тороидальные вихри осуществляют интенсивное вертикальное перемешивание вод над подводными горами в Мировом океане.

Представят интерес модели отдельных регионов, например, для Тихого океана – с возможным прогнозом явления Эль-Ниньо. Весьма важной представляется вихреразрешающая модель Циркумполярного Антарктического течения, которая должна будет предсказывать не только меандрирование и рингообразование, но и формирование многоструйности. Такие модели будут основой океанологических прогнозов на сроки в несколько недель.

Расчеты колебаний климата по полным трехмерным моделям климатической системы атмосфера – океан – суша будут возможными на сроки до нескольких лет. Такой оптимистический вывод можно сделать на основе доклада сотрудника ИВМ РАН на последнем метеорологическом конгрессе. Вопрос является актуальнейшим – в частности, приведет ли изменение климата к таянию арктических льдов, которые по некоторым моделям сохранятся только около полюса, или система обратных солнечно-земных и атмосферно-гидросферно-литосферных связей будет поддерживать существующее положение вещей?

В докладе на Метеорологическом конгрессе (июль 2014 г.) В. П. Дымников выделил ключевые проблемы физики гидросферы – прогноз погоды и прогноз изменений климата на основе единой мо-

дели. Другое современное направление – переход от климатической модели к модели земной системы. Новые задачи: проблема «метановой бомбы», солнечно-земные связи, космическая погода и т. д. Модель земной системы содержит цикл углерода, цикл метана, химию атмосферы, учет некоторых электрических явлений и т. д. Все это наводит на мысль – это ли не признание ограниченности и несовершенства климатической модели?

Вот еще актуальные вопросы, связанные с климатом:

- проблема охлаждения глубинных вод Мирового океана на фоне общего потепления поверхностных вод;
- причина исчезновения купола холодных вод в Норвежском море, вследствие чего усилилось прямое проникновение теплых атлантических вод в Арктику;
- проблема формирования явления Эль-Ниньо (физика, источник периодичности).

В связи с шельфовой тематикой можно назвать исследование гидродинамики речных плюмов в приливных морях, интрузии морских вод в устья приливных рек.

Морская геология

Крупнейшие задачи морской геологии – исследование полезных ископаемых Океана (нефти, газа, минеральных россыпей, железо-марганцево-полиметаллических конкреций, металлоносных осадков, фосфоритов и др.).

В области морской геологии необходимо продолжить работы по картированию дна океана. При помощи локаторов бокового обзора, многолучевых и узколучевых эхолотов, а также обитаемых подводных аппаратов будут составлены подробные карты значительных по суммарной площади участков дна океанов и морей – их рельефа (в том числе всех каньонов), грунтов и различных особенностей. Эта деятельность будет продолжаться и позже, и все ускоряющимися темпами, пока не будет покончено с существующим положением, при котором поверхность дна океана нам известна хуже, чем поверхность обратной стороны Луны, невидимой с Земли, но сфотографированной космическими аппаратами. В первую очередь будут картироваться участки дна национальной юрисдикции развитых стран, а также представляющие специальный интерес участки дна открытого океана, например, для добычи железо-марганцевых конкреций.

Специальное внимание будет уделено картированию районов, перспективных на сульфидные руды, в том числе участков рифтовых зон срединно-океанских хребтов, особенно на их пересечениях с трансформными разломами. Будет завершено прогнозирование нефтегазоносности всех акваторий Мирового океана, в перспективных акваториях – геофизическая разведка структур, могущих быть коллекторами нефти и газа. Для России это Баренцево море, возможно, мелководная зона Карского моря с намораживаемыми островами, Охотское море, несомненно – Берингово море, а затем и весь арктический шельф, что является одной из причин, делающих актуальным расширение океанологических исследований в Арктике. Эти работы должны сопровождаться исследованием механизмов формирования нефтяных, газовых и газогидратных залежей в океанических условиях.



Президент России поздравил с установкой крупнейшей в России нефтегазодобывающей платформы «Беркут» в Охотском море

Морская добыча нефти и газа существенно расширится, охватит новые акватории и большие, чем ныне, глубины моря. На подходящих месторождениях она дойдет до глубин около 1 км, и хотя образец океанского донного завода для бурения и добычи нефти уже создан в США, представляется более вероятным, что до указанных глубин океана будут использоваться надводные нефтедобывающие платформы, устанавливаемые на дно на ногах или заякоренные. Установка и эксплуатация подобных платформ потребуют работы водолазов в режиме длительного пребывания при давлениях до 100 атмосфер.

Важным вопросом является исследование гидродинамических и геологических процессов

материковых склонов, поскольку эти области являются наиболее перспективными для добычи углеводородов. Это сложная комплексная проблема.

Актуальные вопросы исследования континентальных склонов Мирового океана:

- морфология, тектоника, глубинное строение и природные ресурсы;
- общие вопросы строения и тектонической эволюции;
- седиментация на континентальных склонах;
- сейсмичность континентальных окраин.

Современная техника позволяет изготавливать оборудование для добычи железо-марганцевых конкреций со дна океана на глубинах около 5 км, например, засасывающую гидравлику или донные бульдозеры, загружающие замкнутую цепочку контейнеров. В ближайшие годы необходимо получить надежные оценки экономичности такой добычи – капиталовложений, расходов на эксплуатацию и амортизацию оборудования, транспортировку и переработку руды с учетом и прогнозом мировых цен на извлекаемые металлы – медь, кобальт, никель, марганец. Необходимо детально картировать наиболее подходящие участки дна промышленной добычи.

Сама добыча потребует непрерывного океанологического обслуживания и в то же время предоставит океанологам станции для непрерывных наблюдений.

Важной задачей является исследование добычи железо-марганцевых корок с вершин гайотов на глубинах около 1,5 км. Втрое меньшая глубина чрезвычайно облегчает работы, высокие концентрации кобальта понижают необходимые объемы рентабельной добычи, но твердость корок выдвигает специфические требования к горнодобывающему оборудованию.

Уже упоминалось, что на некоторых участках спрединга в океанах на глубинах около 3,5 км при помощи обитаемых подводных аппаратов обнаружены гидротермальные источники – «черные курильщики», т. е. подводные гейзеры с очень горячей водой и выпадающим из нее осадком с очень высокими концентрациями сульфидов цинка, меди, кобальта, никеля и некоторых других металлов. В ряде случаев обнаружены залежи таких сульфидных руд довольно большого объема. Необходимо исследовать их перспективность. Возможно, что вследствие меньшей глубины и значительно большей концентрации металлов они смогут представить больший промышленный интерес, чем залежи железо-марганцевых конкреций. По некоторым оценкам эти залежи сравнимы с разрабатываемыми на суше.

Будут составлены палеоокеанологические реконструкции формы, рельефа дна, условий среды, климата, биоса, рудообразования палеоокеанов на период до 670 млн лет. Это позволит получить новые данные о расположении полезных ископаемых, в том числе на материках.

Измерения поля скоростей мантийной конвекции позволили бы расшифровать конфигурацию конвективных ячеек и тем самым полностью завершить построение теоретических основ тектоники литосферных плит, что имело бы принципиальное значение для наук о Земле в целом и для планетологии вообще. Сегодня для этого имеется несколько подходов, все они связаны с океанологией.

Биология океана

Биология океана занимается изучением планктона, nekтона, бентоса и микроорганизмов. Изучается их систематика, биология развития, экология, эволюционная история, пищевые взаимоотношения, структура и функционирование биологических сообществ, динамика популяций промысловых организмов, климатические различия в морских экосистемах и, в частности, прибрежных, океанических и эстуарных.

О проблемах биологии океана уже говорилось в вводной части, но ввиду важности можно повторить еще раз. В области биологии дальнейшее развитие получит морское рыболовство. Будет организован мониторинг (в том числе гидроакустический и спутниковый) ряда основных промысловых стад и популяций морской рыбы. В частности, будут разработаны методы прогноза ежегодной рекрутизации молоди в эти стада, подсадки искусственно выращиваемой молоди, с использованием приемов генетики и селекции, подкормки, борьбы с хищниками, заболеваниями и паразитами. Другими словами, это будут окультуренные человеком рыбные стада.

Будет решен вопрос о возможности регулярного промысла криля.

Вероятно, будет резко расширен ассортимент, увеличены масштабы и усовершенствованы методы искусственного выращивания полезных морских организмов применительно к каждой



Всюду жизнь

конкретной прибрежной акватории. В частности, будут расширены выращивание и селекция организмов, вырабатывающих или осуществляющих биоконцентрирование лекарственных и других ценных веществ (по японскому примеру выращивания асцидий для концентрирования ванадия). Будет практиковаться в расширяющихся масштабах выращивание макроводорослей, возможно, с применением удобрений.

Будут разработаны и испытаны биологические методы использования эвтрофикации морских бассейнов, разведение рыб, питающихся, в частности, синезелеными водорослями, разведение бентосных организмов – фильтраторов и т. п.

Будут разработаны математические модели замкнутых и квазизамкнутых морей, учитываю-

щие взаимодействие с атмосферой и сушей, для осуществления управления рыбным хозяйством.

Будут составлены математические модели пространственно-временных распределений в Мировом океане основных форм биогенных элементов (углерода, кислорода, кремния, азота и фосфора), которые будут использованы для объяснения особенности их пространственно-временного распределения биогенных элементов, различия между океанами. Это позволит получать надежные прогнозы первичной продукции, последствий антропогенных воздействий.

Использование ресурсов Мирового океана решит проблему питания человечества.

Химия океана

Основные проблемы химии океана – химический баланс океана (его химический обмен с континентами через речной сток, атмосферой и дном); идентификация различных водных масс; происхождение и геохимическая эволюция вод океана; извлечение ценных веществ из морской воды; химическое загрязнение океана, формирование месторождений полезных ископаемых.

В области морской биохимии будут созданы новые методы выделения химических элементов и очистки от загрязнений на основе биоконцентрирования и хемосинтеза.

В области морской геохимии будут разработаны методы создания искусственных геохимических барьеров для регулирования потоков химических элементов, что будет применено для борьбы с загрязнениями и добычей химических элементов.

Принципиальное значение приобретает открытие в окрестностях глубоководных донных гидротерм оазисов жизни без фотосинтеза с первичной продукцией бактерий, синтезирующих органику из углекислоты, сероводорода и растворенных сульфидов без солнечного света, и с существующими на этой базе крупными животными с редуцированным или даже вовсе отсутствующим пищеварительным аппаратом.

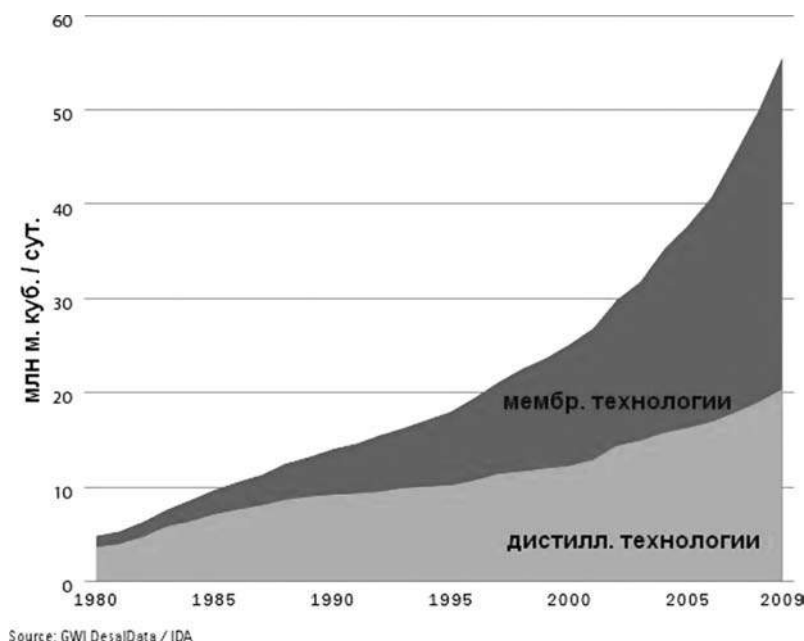
Напрашиваются, прежде всего, две актуальные проблемы. Первое – необходимость поисков таких или аналогичных экосистем не только в окрестностях донных гидротерм, но и в холодных морях, например, в областях сероводородного заражения Черного моря. Второе – возможность радикального пересмотра существующих представлений о происхождении и эволюции жизни, которая могла развиваться не от цианобактерий, а от хемосинтезирующих бактерий. Причем животные, даже крупные, могли появиться и в бескислородной среде, т. е. много раньше, чем это считается сейчас.

Область неисчерпаемых возможностей – использование энергетического потенциала Океана. По оценкам разных авторов, доступная часть энергии Мирового океана (энергетический потенциал гидросферы), т. е. та часть, которая может быть практически использована при современном уровне техники преобразования, почти в два раза превышает уровень современного потребления энергии в мире – $0,3 \times 10^{21}$ Дж в год.

И еще просто о воде.

По прогнозу ООН к 2025 г. около 5,5 млрд человек может испытывать водный стресс.

К основным способам устранения проблемы дефицита пресной воды можно отнести опреснение морской воды.



Рост опреснения морской воды в мире

В заключение несколько слов о проблемах образования. Во время Метеорологического форума в июне этого года состоялся круглый стол по проблемам образования. Была высказана озабоченность положением образования по направлению гидрометеорологии. На будущий год планируется провести специальную конференцию по вопросам образования в гидрометеорологии.

И совсем в конце о кафедре физики моря и вод суши.

Кафедра физики моря и вод суши готовит специалистов-физиков широкого профиля для научно-исследовательской работы в области физики океана.

Следует отметить, что подобная форма подготовки специалистов в области физики моря и вод суши существует только на физфаке МГУ. Подготовка океанологов ведется на географических факультетах (МГУ, СПбГУ, РГТМУ, Ростовского, Калининградского, Владивостокского университетов). Все кафедры океанологии были созданы позже нашей. Некоторое подобие подготовки специалистов существует на физтехе. И все.

Подобная картина имеет место и за рубежом. Например, в США подготовка океанологов тоже ведется на базе геолого-географических факультетов. Как отмечается в журнале *Physics today*, N 10, 2004, из 29 университетов США, готовящих океанографов, полный курс механики жидкостей читается только в шести, т. е. это нефизическое образование.

Цель лекции заключалась в желании показать, что глобальные проблемы, стоящие перед человечеством, могут быть решены на путях исследования и освоения Мирового океана. Глобальные проблемы человечества могут быть решены только с активным участием молодежи.

Призываю Вас в ряды океанологов!

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры экономического роста тех или иных стран мира, который связан с вложением средств в изучение и освоение Океана.
2. Каковы основные задачи океанологии?
3. С чем связан интерес России к освоению Арктики в прошлом и настоящем?
4. Назовите основные проблемы исследования климата и Мирового океана.
5. Чем занимается одно из направлений океанологии – химия океана?

Литература

- Иванов В. А., Показеев К. В., Шрейдер А. А. Основы океанологии. СПб.: Лань, 2008. 576 с.
Лаверов Н. П. Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2003. 635 с.
Чашечкин Ю. Д. Современное состояние проблемы изучения и освоения мирового океана в рамках федеральной целевой программы «Мировой океан» // Советский физик. 2002. № 1 (26).

ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

А. М. Догановский

Российский государственный гидрометеорологический университет

Введение

Представленный материал может быть использован при подготовке лекций для студентов естественно-географических специальностей вузов и при изучении курса географии в общеобразовательных школах.

Территория Северо-Запада России относится к промышленно развитым территориям страны. Природные условия этой территории определяются избыточным и достаточным увлажнением и, как следствие, хорошо развитой гидрографической сетью. Особое место в сети занимают озера – водоемы замедленного водообмена. Их количество превышает 100 тыс., а коэффициент озерности составляет 10–15 %, что позволяет отнести территорию к районам с повышенной озерностью (средняя по стране озерность – около 2 %).

Такое количество озер не может не привлекать к ним внимание, тем более что их режимные характеристики заметно отличаются от аналогичных характеристик других водных объектов, и в первую очередь рек. Изменяются, соответственно, и водные экосистемы, физико-химические свойства водных масс и т. п. Основные причины таких различий – увеличение продолжительности пребывания воды в котловинах озер. И чем больше время пребывания, тем заметнее изменения. Кроме того, озера вместе с их водосборами образуют озерные системы, которые формируют особые озерные ландшафты. Влияют озера и на сток вытекающих рек, снижая максимальные и повышая минимальные расходы.

Также озера можно рассматривать как природные аккумуляторы, в той или иной степени задерживающие поступающие с водосборов различные вещества природного и антропогенного происхождения. При этом возможно заиливание, зарастание озер, изменение их трофического статуса, активизация автохтонных процессов.

Вместе с тем озера широко используются в хозяйственных целях. Среди направлений такого использования гидроэнергетика, водоснабжение и водоотведение, рыбное хозяйство, рекреация, добыча сапропеля и др.

Таким образом, одной из основных задач при изучении озер и условий их использования является разработка способов оценки параметров, определяющих интенсивность внешнего водообмена озер и времени пребывания воды в них.

В качестве такой характеристики принят коэффициент условного внешнего водообмена (K_B), определяемый за многолетний или любой другой период времени. Интерес также представляет изменение этого коэффициента по территории.

Гидрологическое значение водообмена и его определение

Внешний условный водообмен – показатель скорости смены воды в водоеме или времени пребывания ее в нем.

Вопросам изучения этого процесса посвящено большое количество исследований, начиная с капитальных работ С. В. Григорьева (1959), С. Д. Муравейского (1948), позже Б. Б. Богословского

(1975), К. К. Эдельштейна (2014) и др. Непосредственно изучением водообмена водоемов Северо-Запада России занимались тот же С. В. Григорьев (1959), И. Н. Сорокин (1988), М. Я. Прыткова (2011), А. М. Догановский (Догановский, 1994, 2007; Doganovsky, 2012), Н. В. Мякишева (2009) и др. Помимо разработки способов определения коэффициентов водообмена некоторыми из них показана роль водообмена в формировании ряда черт и особенностей гидрологического, гидрохимического, гидробиологического режима водоемов. Интенсивность водообмена также во многом определяет трофический статус водоемов, роль аллохтонных и автохтонных процессов в формировании водных масс, предопределяет скорость заиления озер и многие другие процессы. В конечном итоге интенсивность водообмена участвует в формировании типа водоема.

В практике гидрологических расчетов и анализа рассматриваются два вида внешнего водообмена, оцениваемые коэффициентами «по притоку» (K'_B) и «по стоку» (K''_B): эти коэффициенты водообмена могут быть определены из уравнения водного баланса, представленного в объемных единицах основными составляющими.

$$V_{\text{пр}} + V_{\text{ос}} - V_{\text{исп}} - V_{\text{ст}} = \pm \Delta V, \quad (1)$$

где $V_{\text{пр}}$ – приток воды с водосбора; $V_{\text{ос}}$ – атмосферные осадки, выпадающие на озеро; $V_{\text{исп}}$ – испарение с водной поверхности; $V_{\text{ст}}$ – сток воды из озера; ΔV – аккумуляция воды в озере.

Коэффициент K'_B может быть представлен, в зависимости от решаемой задачи, как частное от деления суммы приходных или расходных составляющих водного баланса на объем воды в озере (V_O). Однако чаще всего при оценке внутриводоемных процессов рассчитываются коэффициенты водообмена лишь по притоку или стоку. С учетом расшифровки составляющих водного баланса $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ст}}$, а также V_O можно записать:

$$K'_B = \frac{V_{\text{пр}}}{V_O} = \frac{h_o A_o}{A_o \bar{H}} = \frac{h_o K}{\bar{H} 10^2} \quad (2)$$

$$K''_B = \frac{V_{\text{ст}}}{V_O} = \frac{I}{\bar{H}} = \left(\frac{h_o K}{A_o 10^2} + P - E \right) \quad (3)$$

где h_o – сток с водосбора озера (мм); A_o – площадь водосбора озера (км²); K – удельный водосбор ($K = A_o/A_o$); $\bar{H}$ – средняя глубина озера (м); P , E – соответственно, осадки на озеро и испарение с его поверхности (мм); A_o – площадь зеркала озера (км²).

Из уравнений следует, что величины коэффициентов водообмена определяются климатическими (погодными) условиями (h_o , P , E) и особенностями строения озерных систем ($\bar{H}$, K , A_o).

Таким образом, при наличии гидрологических и батиграфических сведений на изученных объектах вычисление K'_B и K''_B не представляет труда. Однако этих данных очень мало, поэтому возникает необходимость определения представленных выше параметров косвенными способами. При этом задача сводится к разработке способов определения V_O и $V_{\text{пр}}$, $V_{\text{ст}}$, а затем K'_B . Подобные работы проводились ранее (Сорокин, 1988; Мякишева, 2009; Сало и др., 2010).

В нашем случае предполагается, что котловины одного и того же происхождения, примерно одинакового времени эволюции должны иметь близкие относительные размеры. Например, котловины тектонического происхождения более глубокие, чем котловины ледникового происхождения и т. п. при одинаковых A_o . Всего на рассматриваемой территории привлечено более 70 изученных объектов разных размеров и построена зависимость объемов (V_O) от площадей поверхностей озер (A_o). Эта зависимость приведена в нашей работе (Doganovsky, 2012).

Таким образом были рассчитаны K'_B и K''_B для большого количества изученных и неизученных озер разных размеров. Результаты расчетов показали, что коэффициенты внешнего водообмена по притоку и по стоку изменяются в широких пределах.

Анализ полученных материалов позволил установить на рассматриваемой территории четыре района, для каждого из которых характерны достаточно тесные зависимости $V_O = f(A_o)$, описываемые уравнением вида:

$$y = ax^m e^{x-l} \quad (4)$$

где $y = \lg(V_0 + 1)$, $x = \lg(A_0 + 1)$, a и m – параметры, зависящие от геоморфологических и геологических особенностей районов. При этом каждому из выделенных районов свойственны свои значения этих параметров (табл. 1).

Таблица 1

Значения эмпирических параметров в формуле (4)

Район	I	II	III	IV
a	0,07	0,03	0,02	0,01
m	0,90	1,02	1,10	1,13

Перечисленные районы в основном соответствуют областям распространения котловин примерно одинакового происхождения, выделенных Д. Д. Квасовым (рис. 1).

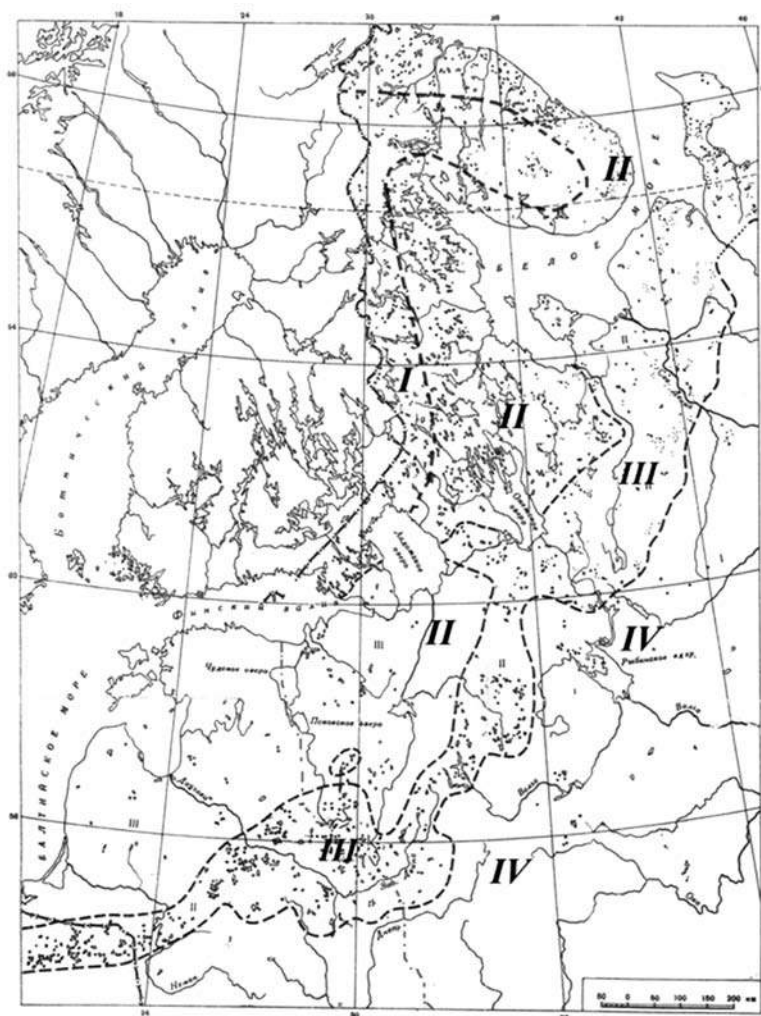


Рис. 1. Районирование территории Северо-Запада РФ

К первому району (I) относятся озера, расположенные в западной части Карелии и на большой части Кольского полуострова на высоте, как правило, более 100 м абс. Котловины озер этого района относятся преимущественно к тектоническому и ледниково-тектоническому типам. Здесь сосредоточены относительно крупные водоемы, имеющие значительные глубины и ориентированные в направлении тектонических нарушений (Топозеро, Нюк, Ровкульское, Лексозеро и др.).

Ко второму району (II) относятся озера восточной части Карелии и Кольского полуострова, высота расположения которых менее 100 м (Ведлозеро, Сумозеро, Лижмозеро и др.). Сюда же относятся

и крупнейшие озера Ладожское и Онежское. Высота их расположения также менее 100 м. Границей района на юге и юго-востоке является граница зоны поздневалдайской ледниковой морфоскульптуры. Этот район известен как район озерно-ледниковых равнин. По сравнению с первым озером здесь более мелководны при одних и тех же A_0 .

Третий район (III) простирается узкой полосой и приурочен к главному моренному поясу, являющемуся зоной максимальной ледниковой аккумуляции. Эта область представляет собой цепь холмисто-моренных возвышенностей, таких как Андомская, Вепсовская, Валдайская, а также Тихвинская и Балтийская гряды. В этом районе расположены озера Ковжское, Валдайское. Имея отметки урезов, как правило, более 100 м, озера этой группы более глубоководные, чем озера района II, но менее, чем района I.

Четвертый район (IV) расположен юго-восточнее и ограничен линией, до которой располагалось Московское оледенение, т. е. примерно до Смоленско-Московской возвышенности. Здесь расположены озера Неро, Плещеево, Чухломское и др. Озера этого района самые мелководные из всех рассмотренных выше. Например, при $A_0 = 100 \text{ км}^2$ средняя глубина озер первого района составляет примерно 10–11 м, второго – 3–4 м, третьего – 5–6 м и четвертого – лишь 2–3 м.

Из изученных объектов высокие значения K_B' имеют в районе I Пулозеро (7,96), Ловозеро (1,44), Верхнее Куйто (1,82) и др. В районе II – Черменецкое (1,31), Ведлозеро (1,60), Сумозеро (0,42). III район – Селигер (0,52), Валдайское (0,11). IV район – Плещеево (0,16), Чухломское (1,02) и т. п. Так как все озера сточные, то $K_B'' > K_B'$. Увеличение K_B'' происходит за счет наличия положительной разницы в уравнении водного баланса, так как осадки всегда превышают испарение. Также были рассчитаны величины K_B' и K_B'' .

При отсутствии наблюдений величины V_0 ($V_0 = \bar{H} \cdot A_0$) и K определяются по соответствующим картам и уравнению (4), h_0 – по картам стока (мм) или с помощью метода аналогии. Таким образом, дополнительно должны быть определены и площади водосборов исследуемых озер.

Транзитно аккумуляционные возможности озер

Внешний водообмен, как и морфология котловин, определяет развитие внутренних процессов в водоемах и, прежде всего, способность удерживать поступающие с водосбора различные вещества, в том числе эвтрофирующие (например, фосфор), продукты эрозии и абразии. Эти вещества влияют как на эволюционные изменения самой котловины при седиментации, так и на формирование физико-химических свойств воды. С этих позиций водоемы можно разделить на две отличающиеся друг от друга группы: транзитные ($K_B'' > 100$) и аккумулятивные ($K_B'' < 1$). Для первой группы характерно преобладание транзитных вод, а гидрологический режим зависит от размеров водосборов, площади которых могут в десятки и сотни раз превосходить площади самих водоемов. В этом случае процессы, происходящие в котловинах, относятся к аллохтонным (терригенные, внешние). В водоемах второй группы преобладает аккумуляция воды и аккумуляция поступивших в озеро веществ. В режиме же главное значение приобретают внутриводоемные процессы (лимнические, автохтонные). Между этими группами можно выделить и промежуточные. Такая классификация водоемов была предложена Б. Б. Богословским (1975), с нашими небольшими уточнениями она приведена в табл. 2.

Таблица 2

Классификация водоемов по внешнему водообмену

Класс	Транзитные	Транзитно-аккумуляционные	Аккумуляционно-транзитные			Аккумуляционные озера
	Сильно проточные		Среднепроточные озера	Слабая проточность	Крупные озера	Бессточные
Водообмен K_B''	>100	10–100	1–10	0,1–10	<0,1	0
Период обмена τ	Часы, сутки	Недели, месяцы	Месяцы, сезоны, годы	Годы, десятилетия	Десятки и сотни лет	–

Для бессточных водоемов $K_B'' = 0$, основной обмен воды происходит через испарение, и все поступающие вещества аккумулируются в озере. Таких водоемов на рассматриваемой территории нет.

Рассчитанные K'_B и K''_B позволили выделить районы, в которых сосредоточены озера, относящиеся к перечисленным классам озера.

Большинство озера рассматриваемой территории относятся к классу транзитно-аккумуляционных и среднепроточных (Верхнее Куйто, Черемнецкое, Водлозеро, Кубенское, Лексозеро, Нюк, Кимас озеро и др.). К слабопроточным относятся Чудско-Псковское, Селигер, Нижнее Куйто, Ведлозеро, Ругозеро, Энгозеро, Сямозеро, Плещеево, с весьма малым водообменом – Ладожское, Онежское, Топозеро и Пяозеро (последние два – до зарегулирования).

Каждому из выделенных классов озера соответствуют свои условия удержания поступающих с бассейна веществ, в том числе и ионный состав воды. В процессе водообмена в озере взаимодействуют воды, поступающие с различных частей бассейна с разными физико-химическими и биологическими свойствами, которые в процессе смешения формируют водные массы водоема и, соответственно, химический состав воды вытекающих рек. Чем более замедлен водообмен, тем дольше водные массы задерживаются в водоеме, больше испытывают влияние лимнических факторов. Это способствует увеличению биомассы, например, зоопланктона. В настоящее время установлены обратные зависимости биомассы зоопланктона и интенсивности внешнего водообмена (Драбкова, Сорокин, 1979; Сорокин, 1988).

Являясь основным показателем доли транзита через озера водных масс и веществ, поступающих с водосбора, величины коэффициентов водообмена при определенных условиях представляют собой показатель уровня трофности водоема.

Каждому водоему свойственна определенная критическая нагрузка (в том числе фосфора), превышение которой вызывает изменение уровня трофности (L_c), т. е. водоем приобретает другой трофический статус. Величина этой нагрузки может быть определена по формуле Фолленвайдера:

$$L_c = \frac{10\bar{H}(1 + \sqrt{\tau})}{\tau} \quad (5)$$

где τ – время полного водообмена, число лет ($\tau = I/K_B$ или V_0/V_{cm}).

Внешний водообмен и уровенный режим озера

Интенсивность внешнего водообмена оказывает влияние на формирование уровенного режима озера через изменение значений параметров кривых распределения. При этом следует знать дисперсию колебаний уровней (амплитуду), закономерность чередований серий лет высокой и низкой водности (цикличность). Однако, к сожалению, нет возможности удлинить ряды уровней и привести их к стационарному ряду. Поэтому при анализе уровенного режима следует стараться рассматривать максимально длинные выборки приблизительно одной длины, исключая периоды искусственного регулирования.

Озера, в отличие от рек, обладают способностью накапливать воду, что приводит к образованию внутренней связанности рядов, возрастанию их автокоррелированности, выраженной через первый коэффициент автокорреляции ($r(1)$). При этом величина этого показателя зависит от интенсивности внешнего водообмена и, видимо, от особенностей строения озерной системы.

Исходя из статистической теории колебаний уровня озера (Калинин, 1971), опираясь на уравнение водного баланса (1), были выведены формулы, демонстрирующие связь между $r(1)$ и факторами, формирующими внутрирядную связанность (Doganovsky, 2012).

$$r(1) = 1 - \frac{K'_B}{\varphi}, \quad (6)$$

где φ – эмпирический параметр, зависящий от строения озерной системы, прежде всего от формы котловины ($\varphi = f(H_{max}/H_{cp})$) и русла вытекающей реки, в зоне колебания уровня, от размеров удельных водосборов (K).

Например, для 60-летних рядов годовых уровней озера Ладожского, Лаче и Умбозеро величины φ равны соответственно 0,3, 3,26 и 6,5, а величины K'_B соответственно 0,08, 3,6 и 4. На рис. 2 в качестве примера представлен график $\varphi = f(\Phi)$ для районов III и II.

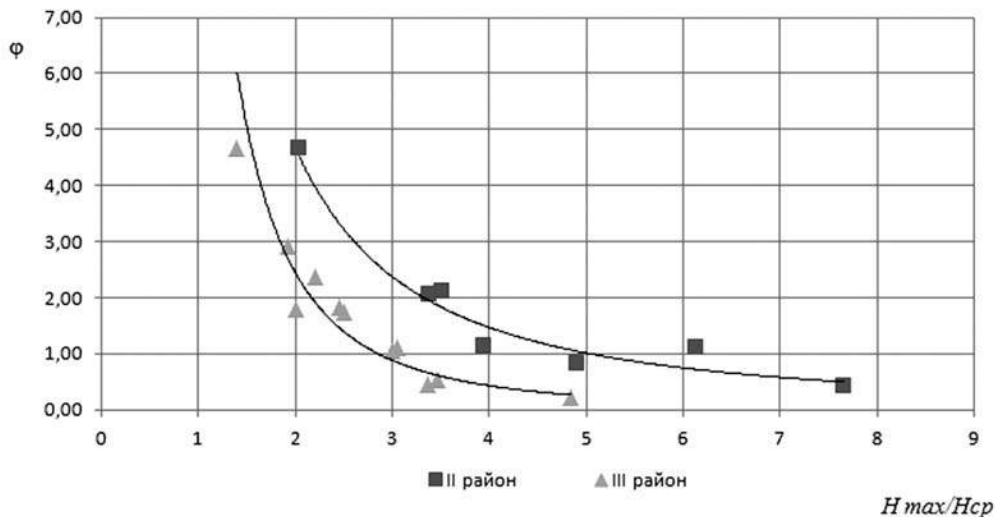


Рис. 2 Зависимость параметра ϕ от формы котловины Φ для озер III и II районов

Величина внешнего водообмена определяет амплитуду колебаний уровней, выраженную через дисперсию ряда ($\sigma_{\Delta H}^2$) (рис. 3).

Это следует из известной формулы сложения дисперсий приходной (σ_1^2) и расходной (σ_2^2) составляющих водного баланса:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sqrt{\sigma_1^2\sigma_2^2}, \quad (7)$$

где r – коэффициент корреляции между приходной и расходной составляющими водного баланса.

Значения r и $r(1)$ связаны соотношением:

$$r = \sqrt{1 - r(1)^2}, \quad (8)$$

тогда уравнение (8) может быть представлено:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2\sqrt{1 - r(1)^2}. \quad (9)$$

Для озер рассматриваемой территории $r(1)$ всегда заключено в пределах 0–1. Следовательно, при $r(1) = 0$ – ($\sigma_{\Delta H}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2$), а при $r(1) = 1$ – ($\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$); очевидно, что $(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) > (\sigma_1 - \sigma_2)^2$.

Таким образом, амплитуда колебаний возрастает с уменьшением K_b' при соответственно одинаковых σ_1^2 и σ_2^2 , т. е. заметную роль играют особенности строения озерных систем.

Например, величины годовых амплитуд за многолетний период равны: для Умбозера $\bar{H} = 70$ см, $\sigma_{\Delta H} = 60$, $K_b' = 0,26$; Ругозера – 44; 13; 0,73; Онежского – 61; 28; 0,08; Сумозера – 12; 4; 0,87; Ильменя – 400; 120; 4,5. Амплитуду колебаний уровней (D) с учетом озерности бассейна можно также определить по формуле, выведенной при аппроксимации установленных зависимостей $D = f(f')$ для I и II районов

$$D = aq(f_m' + 1)^{-m}, \quad (10)$$

где a , m – эмпирические критерии, характеризующие строение озерных систем, числовые значения для каждого района приведены ранее (Догановский, 1994); q – модуль многолетнего стока рек, впадающих в озеро; f_m^I – взвешенная озерность, определенная как:

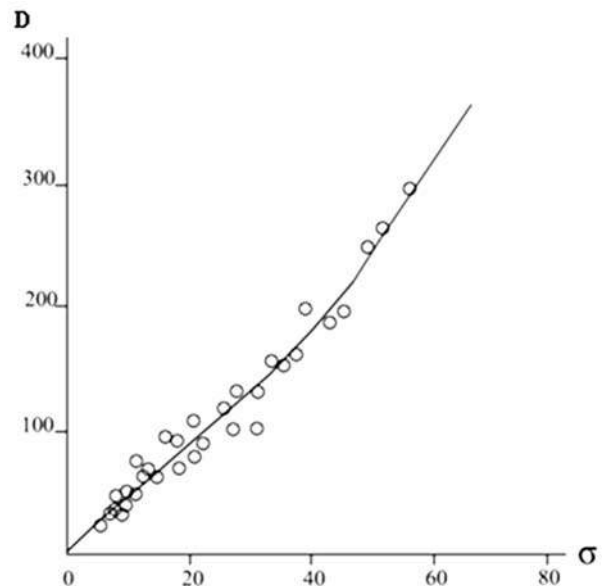


Рис. 3. Зависимость амплитуд колебаний от средних квадратических отклонений приращений уровней при $\Delta t = 1$ год

$$f_{оз}^I = 100/A^2(A_{о1}A_1 + A_{о2}A_2 + \dots + A_{он}A_n), \quad (11)$$

где $A_{о1}A_1; A_{о2}A_2; \dots; A_{он}A_n$ – соответственно, площади озер и их водосборов, которые входят в состав площади водосбора всего изучаемого объекта (A).

При отсутствии в бассейне озера других озер величина f_m^I в (10) превращается в «показатель площади озера», равного $\Delta A = A_{о3}/A_6$. Анализ структуры временных рядов уровней озер, оцененных с помощью спектрального анализа, позволил установить наличие хорошо выраженных, особенно на крупных озерах, около 30-летних периодов колебаний. При этом амплитуды этих колебаний возрастают при уменьшении интенсивности внешнего водообмена, одновременно появляются более низкочастотные флуктуации. В этом случае «вклад» 30-летних флуктуаций в общую дисперсию колебаний $\sigma_{\Delta H}^2$ уменьшается в зависимости от возрастания K_B' . Для Ладожского озера при $K_B' = 0,08$ ($\sigma^2/\sigma_{\Delta H}^2$) = 0,4, для оз. Ильмень ($K_B' = 4$) – 0,2. В то же время с уменьшением K_B' возрастает доля случайной компоненты (Догановский, 2006) и характер колебаний уровней озера приближается к колебаниям речного стока.

Для озер северной части рассматриваемой территории (преимущественно **I и II районы**) рассчитанные спектры не фиксируют заметного вклада каких-либо частот, озерам других районов свойственна квазипятилетняя цикличность (Догановский и др., 1999). Таким образом, чем менее интенсивен внешний водообмен, тем более четко проявляются низкочастотные флуктуации.

Очевидно, что величина K_B' оказывает влияние и на другие характеристики кривых распределения уровней воды.

Заключение

В настоящей работе представлены доказательства важной роли интенсивности внешнего водообмена озер при формировании некоторых черт гидрологического, гидрохимического, гидробиологического режимов водоемов. Прежде всего при формировании транзитно-аккумуляционных возможностей озер и закономерностей уровня режима эти характеристики в дальнейшем будут использоваться при оценке изменчивости коэффициента водообмена. Приведенный показатель может быть использован значительно шире. К первостепенным задачам при совершенствовании расчетных методов режимных характеристик методов, где в качестве аргументов выступает K_B' , необходимы более совершенные способы определения этой характеристики для неизученных объектов и ее изменение во времени.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите примеры водоемов России с замедленным водообменом.
2. Определите коэффициент озерности Карелии, Мурманской области.
3. Определите площадь водосбора Ладожского и Онежского озер.
4. Какова величина внешнего водообмена Ладожского и Онежского озер.
5. Назовите основные причины внутривековых колебаний уровня воды озер Северо-Запада России.

Литература

- Богословский Б. Б. О водообмене водоемов и водных массах водных объектов // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 270–275.
- Григорьев С. В. О некоторых определениях и показателях в озероведении // Тр. Карельского филиала АН СССР. Вып. 18: Материалы по гидрологии. Петрозаводск, 1959.
- Догановский А. М. Амплитуды колебаний уровней воды в водоемах озерного района ЕТР и их расчет // Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛГМИ, 1994. № 116. С. 115–125.
- Догановский А. М. Многолетние колебания уровня Ладожского озера // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 175–183.
- Догановский А. М. Уровень режим озер – интегральный показатель климатических и экологических изменений // Общество, среда, развитие. 2007. № 1. С. 103–110.
- Догановский А. М., Румянцев В. А., Трапезников Ю. А., Харбалладзе М. А. Долгопериодная изменчивость уровня озер Северо-Запада России // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. СПб., 1999. С. 77–86.
- Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 196 с.
- Калинин Г. П. О статистической теории колебаний уровней воды в бессточных водоемах // Метеорология и гидрология. 1971. № 6. С. 76–82.

- Муравейский С. Д. Очерки по теории и методам морфометрии озер // Вопросы географии. 1948. № 7.
- Мякишева Н. В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: Гидрометеоздат, 2009. 153 с.
- Последний ледниковый покров на Северо-Западе Европейской части СССР / Под ред. И. П. Герасимова. М.: Наука, 1969. 322 с.
- Прыткова М. Я. Гидрологический режим и заиление малых разнотипных водоемов Северо-Запада. СПб.: Наука, 2011. 200 с.
- Сало Ю. А., Потахин М. С., Толстиков А. В. Расчет средней глубины озер при отсутствии батиметрических данных на примере водоемов Карелии // География: Проблемы науки и образования. LXIII Герценовские чтения. СПб., 2010. С. 410–413.
- Сорокин И. Н. Внешний водообмен озер СССР. Л.: Наука, 1988. 180 с.
- Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.
- Doganovsky A. M. External water exchange of lakes as the integral indicator of water body types // Limnological review, Polish Limnological society. 2012. Vol. 12, N 1. P. 11–17.

ГЕОФИЗИКА – СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Н. В. Шаров

*Институт геологии КарНЦ РАН,
Петрозаводский государственный университет*

Велико есть дело достигать во глубину
земную разумом, когда рукам и оку
достягнуть возбраняет натура;
странствовать размышлениями
в преисподней, проникать рассуждением
сквозь тесные расселины и вечную
ночью помраченные вещи и деяния
выводить на солнечную ясность.

М. Ломоносов. О слоях земных. 1757

Введение

Парадоксально, но факт: человек научился определять состав звезд, удаленных на миллиарды километров, познавать процессы, происходящие в их глубинах, но еще лишь на подступах к недрам Земли. Ведь при ее радиусе более чем 6350 километров самая глубокая в мире Кольская скважина достигла лишь 12,2-километровой отметки. Наша планета состоит из твердого тела собственно Земли, Мирового океана (гидросфера), атмосферы (газообразная оболочка) и магнитосферы. И все они вместе составляют ту среду, в которой существует человечество.

И все-таки люди нашли способ «заглядывать» в глубь своей планеты: наши представления о внутреннем строении Земли основаны на анализе физических полей – сейсмического, гравитационного, электромагнитного, термического, радиоактивного и др. Физическими полями и физическими свойствами вещества Земли занимается планетарная геофизика. Геофизики еще в начале века установили, что наша планета имеет плотное ядро, мощную мантию и сравнительно тонкую кору. В дальнейшем было выяснено, что эти геосферы дополнительно расслоены (по плотности и другим физическим свойствам) еще на ряд оболочек. Современное развитие сейсмической картины геосфер связано с детализацией и уточнением этих открытий отчасти путем увязки сейсмических данных с термическими, электромагнитными, гравитационными.

В последние годы получены новые результаты глубинного строения Земли сейсмическими и другими геофизическими методами. Пристальное внимание уделяется земной коре и верхней мантии. Мантия вызывает жгучий интерес геологов, потому что в ней сосредоточено основное вещество

Земли (две трети массы планеты). Главное, что в ней корни, истоки многих процессов, которые неумолимо вторгаются в жизнь человека: дрейф континентов и сопутствующих ему землетрясений, вертикальных движений отдельных участков земной коры и связанных с ними грозных стихийных явлений.

Интересно отметить, что используя данные о характере и особенностях землетрясений, а также о размерах горных сооружений, первый русский академик М. В. Ломоносов вычислил толщину земной коры – от 30 до 70 км (М. Ломоносов. О слоях земных. Санкт-Петербург, 1757). Полученное им значение близко к общепризнанному в настоящее время, хотя в своих расчетах он исходил из неверных положений, сравнивая земную кору с архитектурным сооружением.

Еще в начале нашего века сейсмологи обратили внимание на то, что упругие волны, родившиеся в очаге землетрясения, несут информацию о строении среды распространения. Выдающийся русский физик академик Б. Б. Голицын, заложивший научные основы сейсмологии, тогда писал: «...можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит. Свет от этого фонаря пока еще очень тусклый, но не подлежит сомнению, что со временем он станет гораздо ярче и позволит нам разобраться в этих сложных явлениях природы» (Лекции по сейсмометрии. Санкт-Петербург, 1912).

В настоящее время еще нет единой теории Земли, нет (и, может быть, не будет) универсальной геологической теории, хотя в теоретической геологии идет быстрое формирование важнейших геодинамических концепций. При таком положении необходимо вновь и вновь возвращаться к исходным фундаментальным постулатам в наших представлениях о Земле, проверяя, насколько они соответствуют возросшему уровню знаний.

На помощь геологу в познании глубинного строения Земли приходит геофизик. *Физика Земли, геофизика – комплекс наук о Земле, ее внутреннем строении, физических свойствах и физических процессах в ее «твердых оболочках», а также в атмосфере и гидросфере.* Выделяются: солнечно-земная физика, физика атмосферы, физика гидросферы, физика твердой Земли. Объект исследования планетарной геофизики невелик, изучаемые ею явления – ураганы и землетрясения, полярные сияния и морские приливы, оледенение и магнитные бури, океанские течения и движения земной коры – не признают государственных границ.

Естественно, что к развитию современной геофизики привлекаются молодые специалисты по физике Земли и геологии. Для их подготовки и повышения квалификации требуются новые учебники и монографии. Широкой популярностью среди читателей пользуются монографии ведущих геофизиков: В. А. Магницкого «Внутреннее строение и физика Земли», В. В. Федынского «Разведочная геофизика», В. Н. Жаркого «Внутреннее строение Земли и планет», Б. Гутенберга «Физика земных недр», М. Ботта «Внутреннее строение Земли», М. Б. Сергеева, Т. В. Сергеевой «Планета Земля», Н. В. Шарова «Физика Земли» и другие.

Геофизика и среда обитания

Антропогенная деятельность и усиливающееся техногенное воздействие на среду ускоряют геодинамические процессы. Причем причиной этого становятся не крупные события – сильные и катастрофические землетрясения, а резкое увеличение числа событий умеренных, слабых и очень слабых. Таким образом, среда реагирует на искусственное воздействие в направлении развития естественного процесса в виде ускорения разрядки напряжений и сохранности метастабильного состояния. Естественно, что в определенных условиях реакция на искусственное возбуждение связана с негативными последствиями. Примеры тому – сильные землетрясения, связанные с созданием искусственных водохранилищ, разработкой полезных ископаемых и др. Но эти отдельные акты ведут к стабилизации обстановки и в принципе искусственными же приемами могут быть отрегулированы: разделены на несколько более слабых актов, растянуты во времени или инициированы в нужный момент.

Нельзя, по-видимому, считать негативным и воздействие проведенных подземных ядерных испытаний на сейсмический поток. Напротив, они должны как бы «смягчить» сейсмичность – резко увеличивать активность слабых землетрясений и тем самым «умерять» землетрясения наиболее сильные, катастрофические.

Таким образом, в целом постоянно усиливающаяся техногенная нагрузка на среду не «перегреет» ее, число наиболее разрушительных землетрясений не возрастет, а, наоборот, вероятно, даже

уменьшится. Среди всех возможных сценариев развития сейсмического процесса под действием искусственных влияний большая часть должна сводиться к уменьшению сейсмической опасности и риска. Это относится в первую очередь к областям высокой тектонической и сейсмической активности. В районах малоактивных, платформенных техногенное воздействие приводит к некоторой сейсмической активизации. Будучи относительно слабо выраженными, эти явления могут, однако, причинить ущерб из-за своей непредвиденности.

Широко распространено и культивируется мнение, что воздействие человека на природу имеет негативный характер практически в любом случае. На примере наведенной сейсмичности можно сказать, что это не всегда так. Действительно, в худшем случае могут возникнуть разрушительные землетрясения там, где их не ждали и, казалось бы, их не должно быть. Но этот эффект может быть предсказан, а его масштаб может быть уменьшен изменением режима воздействия.

Рассмотрим *соотношение биосферы и твердой Земли*. Эти отношения определяются, во-первых, геофизическими полями, во-вторых, непосредственными контактами живого вещества биосферы с «костным» веществом Земли. Так, *гравитационное поле* является основной предпосылкой возможности существования поверхностных геосфер и важнейшим регулятором их развития. При отсутствии гравитационного поля продукты разрушения горных пород не образовали бы стратисферы, укладываясь на поверхности Земли горизонтальными слоями, а распылились бы в космическом пространстве. Физически невозможным было бы существование водоемов, являющихся, по распространенному мнению, первичной средой формирования жизни. Само существование биосферы обязано гравитационному полю, обеспечивающему ее пространство и форму. В качестве регулятора гравитационное поле влияет на рост растений и животных, обеспечивая оптимальные соотношения между их размерами, весом, формой и, в частности, системой опор. Рост деревьев обычно связан не только со «стремлением к солнцу», но с необходимостью расположения центра тяжести дерева над поверхностью его опоры с учетом прочности ствола изогнутых деревьев в местностях, доступных для сильных ветров. С гравитационным полем связана возможность существования организмов, в частности рыб, в водной среде. А если гравитационное поле определяет существование и регулирует развитие биосферы, то и его аномалии обязательно на нее влияют. Надо найти возможности определять влияние гравитационных максимумов, минимумов и градиентных зон на процессы в биосфере.

Очень существенно влияние *геомагнитного поля* на биосферу. Оно во многом определяет ориентацию организмов при дальних миграциях (рыб и перелетных птиц). Магнитное поле также влияет на биологические процессы в зависимости от того, как они ориентированы по отношению к силовым линиям. Колебания магнитного поля Земли и магнитные бури, вызываемые изменением солнечной активности, оказывают существенное воздействие на живое вещество биосферы. Далеко еще не восстановлена целостная картина такого воздействия, но с колебаниями магнитного поля некоторые ученые уже связывают урожайность зерновых, размножение и миграцию животных, эпидемии, рост обострений сердечно-сосудистых, нервных и психических заболеваний.

Тепловое поле Земли влияет на биосферу и организмы в смысле сохранения коренных систем и существования животных, использующих глубокие норы, хотя связанный с Землей в целом ее суммарный поток в четыре тысячи раз меньше количества тепла, поступающего на Землю от Солнца, и поэтому практически не сказывается на климате.

Мы привели в самом общем виде соображения о тех или иных влияниях геофизических полей Земли на биосферу и непосредственно на человека. Однако между твердой Землей и организмами биосферы существуют взаимоотношения, природа которых далеко не достаточно ясна.

В последнее время внимание геофизиков все больше привлекают явления космического и земного происхождения, в той или иной степени влияющие на среду обитания и условия жизнедеятельности человека. Развивается новая, экологическая отрасль геофизики, расширившая традиционный круг за счет включения в него вопросов, связанных с изучением загрязнения природной среды, и получившая название «экологическая геофизика».

Экологическая геофизика представляет собой область прикладной геофизики, в которой геофизические методы используются при изучении опасных с экологической точки зрения геологических процессов и явлений, а также разного рода загрязнения среды обитания. Экологическая геофизика охватывает проблемы влияния физических полей естественного (космического и земного) и искусственного

происхождения на экосистемы и человека. Она изучает взаимоотношения природно-технических систем и человеческого общества в сфере энергообмена, а также управления геоэнергетикой.

На геофизическую среду влияют эндогенные (тектонические) и экзогенные силы (перепады атмосферного давления и температуры воздуха, космическое влияние, связанное с гравитационным и электромагнитным воздействием). Прямо или опосредованно влияет на литосферу и человек. Заполнение водохранилищ, забор воды из рек и скважин на орошение и хозяйственные нужды, ядерные взрывы, запуск тяжелых ракет и многое-многое другое сказывается на процессах, происходящих в земной коре. При этом следует учитывать, что геофизические поля сложным образом взаимодействуют между собой.

Выскажем еще одно соображение. А. Л. Чижевский (1922 г.) в своих работах показал связь процессов, происходящих в социальной, политической, экономической, медико-биологической сферах, с космическими процессами. Процессы, происходящие в недрах Земли и в космосе, одновременно влияют на литосферу, на людей и на технические объекты (Чернобыль, истощение озонового слоя, глобальная разрушительность военной геофизики и др.). Именно этим можно объяснить одновременное или почти одновременное происхождение землетрясений, национальных конфликтов, природно-техногенных катастроф в некоторых регионах.

Геофизическая обсерватория «Петрозаводск»

24 января 2013 г. на территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН, Полярного геофизического института КНЦ РАН, горно-геологического факультета ПетрГУ открыта Геофизическая обсерватория. Основной целью ее является проведение сейсмологических наблюдений на территории Республики Карелия, измерение вариаций и микропульсаций геомагнитного и геоэлектрического полей (МВС) в районе Петрозаводска, развертывание приемного пункта спутниковой томографии для контроля состояния верхней ионосферы, пункта спутниковой геодезической сети (GPS).

Станции для измерений вариаций и микропульсаций геомагнитного и геоэлектрического поля (МВС) и приемный пункт спутниковой томографии для контроля состояния верхней ионосферы предоставил ПГИ КНЦ РАН. Современные цифровые станции в районе Петрозаводска вместе с работающими на Кольском полуострове МВС фактически образуют меридиональную цепочку. Такая конфигурация станций позволит определять расположение и параметры локальных эквивалентных токовых структур, распределение амплитуд возмущений в геомагнитном поле, оценивать распределение электрических полей индукционного характера при различных уровнях возмущений.

Ботанический сад ПетрГУ находится на окраине города Петрозаводска, на него слабо влияет его техногенное воздействие, есть электричество, территория охраняется. Можно организовать канал передачи данных от обсерватории в университет и институт. Это идеальное место для размещения геофизической аппаратуры (рис. 1, 2).



Рис. 1. Сейсмпавильон и здание администрации Ботанического сада ПетрГУ



Рис. 2. Гроза и полярное сияние в районе Петрозаводска

Геофизическая обсерватория имеет программно-технический комплекс, ориентированный для измерения сейсмологических, геомагнитных, геоэлектрических, ионосферных полей. Ученые ведут прием сигналов от низколетящих искусственных спутников Земли, находящихся на приполярных орбитах на высоте от 850 до 1000 км с помощью радиотомографического комплекса (рис. 3). Он предназначен для измерения разностного эффекта Доплера, а также регистрации амплитуды и разности фаз принятых когерентных волн на частотах 400 и 150 МГц. Суть его работы заключается в том, чтобы восстановить электронную концентрацию ионосферы, которая важна для многих приложений по записям разности фаз между сигналами, излучаемыми спутниками.

Еще одно важное оборудование – индукционный магнитометр для измерений вариаций и микропульсаций геомагнитного и геоэлектрического поля (МВС) в районе Петрозаводска (рис. 4). С его помощью изучаются колебания магнитного поля и влияние космической погоды на организм человека. Идея работы прибора заключается в следующем: контролируемый источник посылает сигнал в толщу земли. И по реакции среды на пути прохождения сигнала можно восстановить строение земной коры. КНЧ и СНЧ электромагнитные поля являются эффективным средством для слежения за процессами в различных геофизических средах: магнитосфере, ионосфере, атмосфере и литосфере. Излучения этого диапазона сопровождают все энергетически мощные геофизические процессы и служат одним из методов их диагностики и мониторинга. В частности, в настоящее время активно изучается связь сейсмических событий с возмущениями электромагнитного поля в этом диапазоне частот. Магнитное поле в КНЧ-СНЧ диапазонах регистрируется индукционным магнитометром. Приборы такого типа эксплуатируются в обсерваториях ПГИ Ловозеро и Верхнетуломский и на архипелаге Шпицберген в течение длительного времени. Такой же магнитометр работает в обсерватории «Петрозаводск».

В октябре 2014 г. установлен цифровой геофизический комплекс GI-MTS-1 (разработчик СПб ИЗМИРАН). Он предназначен для проведения измерений вариаций магнитных, электрических по-



Рис. 3. Радиотомографический приемник сигналов на частотах 400 и 150 МГц искусственных спутников Земли для изучения ионосферных полей



Рис. 4. Индукционный магнитометр для измерений вариаций и микропульсаций геомагнитного и геоэлектрического полей

лей и сейсмических колебаний. Комплекс позволяет регистрировать в цифровом виде три взаимно-ортогональные компоненты переменного магнитного поля, три компоненты электрического (теллурического) поля и три компоненты сейсмических колебаний в диапазоне частот от 0 до 15 Гц.

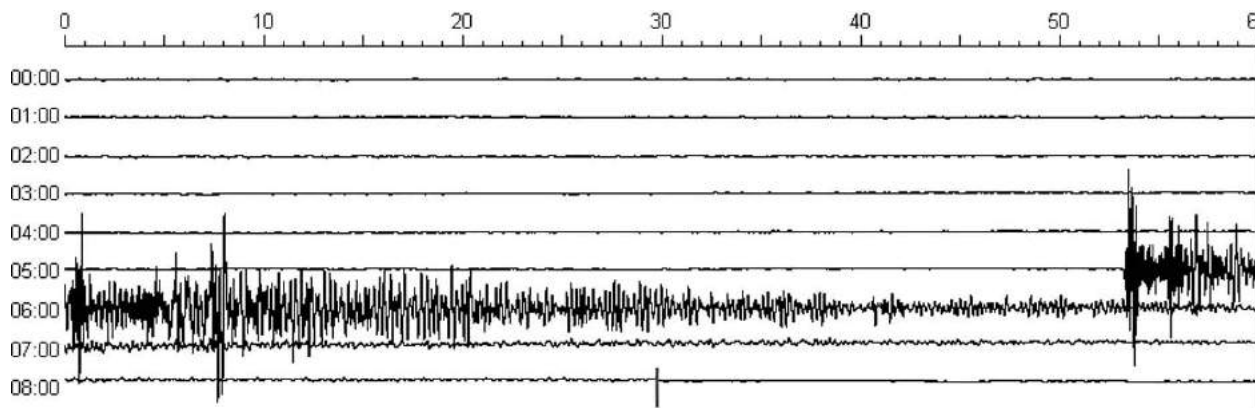


Рис. 5. Запись землетрясения на глубине 610 км, произошедшего в Охотском море 24.05.2013 в 9.53 московского времени, на станции «Петрозаводск». На территории Карелии оно было 3,0–3,5 балла

Построен сейсмологический павильон, представляющий собой крытый постамент, соединенный со скалой, на котором расположено спецоборудование. Здесь регистрируются как слабые региональные сейсмические события, так и телесейсмические землетрясения (рис. 5). Вновь открыта широкополосная сейсмическая станция «Петрозаводск» с регистратором GSR-24 и сейсмодатчиком CMG-3ESP (рис. 6).



Рис. 6. Сейсмические регистраторы

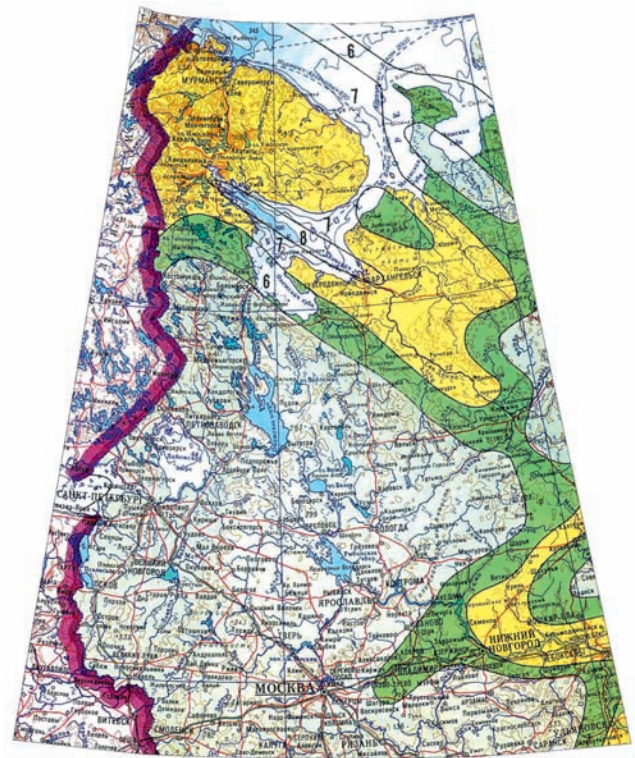
ских методов. Кроме того, геофизическая обсерватория позволит накапливать информацию о тех или иных геофизических явлениях и делать более точные прогнозы относительно изменений геофизических полей и их влияния на организм человека и окружающую среду.

Сейсмологические наблюдения в Республике Карелии

Сейсмичность является одним из наиболее ярких проявлений современной тектонической активности. Карта сейсмического районирования России ОСР-97 относит территорию Карелии к зонам вероятной интенсивности V–VII баллов для периода повторяемости 5000 лет (рис. 7). Сейсмическая активность приурочена к палеорифту Кандалакша-Двина и Ладожско-Ботнической шовной зоне (рис. 8). Несмотря на относительно низкий уровень сейсмической активности, детальное изучение территории Карелии представляет не только теоретический, научный интерес, но и имеет практическое значение, заметно возросшее в связи с наличием в регионе крупных промышленных комплексов, газопроводов и гидротехнических сооружений.

Обсерваторский пункт спутниковой геодезической сети (GPS). Погрешность определения координат составляет около 5 мм, т. е. позволяет определять изменение положения обсерваторской точки (ее движение) относительно центра масс Земли с погрешностью не хуже 5 мм в год. На основании данных мировой сети GPS строят векторы движения основных блоков Евро-Азиатского континента.

Появление геофизической обсерватории «Петрозаводск» внесло огромный вклад в развитие геофизики в Карелии. Ведь поиск полезных ископаемых, строительство газопровода и других объектов невозможно без применения геофизиче-



ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОСТИ СОТЯСЕНИЙ
на средних грунтах в баллах шкалы MSK-64



ВЕРОЯТНОСТЬ ПРЕВЫШЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
в любом пункте зоны в течение 50 лет составит 1%, что соответствует
среднему периоду $T=5000$ лет повторяемости таких сотрясений.
На шельфе интенсивность сотрясений в зонах указана цифрами

Рис. 7. Фрагмент карты общего сейсмического районирования территории России ОСР-97

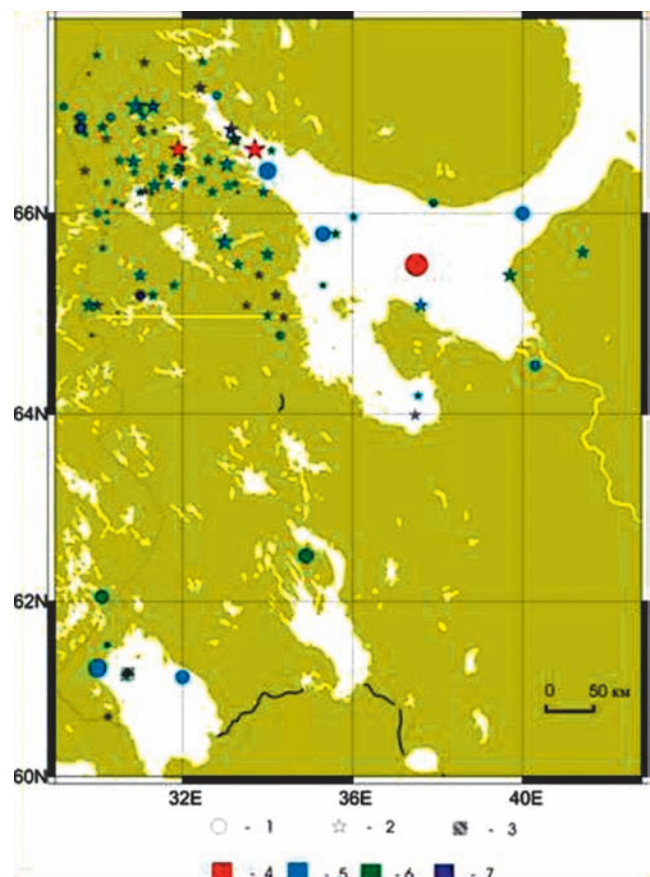


Рис. 8. Карат эпицентров землетрясений Карельского региона (1542–2013 гг.) (Землетрясения..., 2007)

Современные движения земной коры (ЗК) Фенноскандинавского щита определяются двумя главными моментами: вертикальным сводообразным поднятием щита в целом и автономными блоковыми движениями. Сводовое поднятие ЗК является продолжением прежних движений, заложенных еще в допалеозойское время. Все блоки ЗК участвуют в общем сводообразном поднятии щита, и многие из них одновременно завершают чисто индивидуальные по отношению к соседним блокам дисгармоничные движения. По современным представлениям сейсмический режим изучаемой территории в значительной степени зависит от геодинамического воздействия на соответствующий объем ЗК со стороны зон субдукции и рифтогенеза. Область перехода от щита к Русской плите (зона сопряжения) наиболее подвержена современным геодинамическим изменениям.

Сейсмичность северо-запада России хотя и не приводит к катастрофическим последствиям, но при существующей концентрации в этом районе промышленных предприятий, подземных коммуникаций, газопроводов, наличии Ленинградской и Кольской АЭС может вызвать чрезвычайные ситуации, например, прорыв подземных вод, распространение радиоактивных и химических отходов из существующих могильников. Осуществление мониторинга техногенных землетрясений на Костомукшском железорудном месторождении позволяет вести контроль за сейсмичностью района. Ее повышение связано с выработкой и перемещением большой массы горных пород.

Инструментальная система регистрации. Станции региональной сети Карелии, принадлежащие ИГ КарНЦ РАН, оснащены системой сбора, которая включает четыре пункта (Землетрясения..., 2007). Схема расположения станций приведена на рис. 9. Точная и абсолютная привязка станции ко времени необходима, особенно при ее работе в составе региональной сети.

Процесс развертывания сейсмической сети начался летом 2000 г. с установки станции РЕТ. Датчики установлены в подвале деревянного двухэтажного здания на постаменте, связанном с выходом коренных пород. Передача данных осуществлялась по радиоканалу, напрямую связывающему станцию с сервером данных Института геологии (Землетрясения..., 2007). Станция эффективно работала до октября 2007 г. и временно закрыта в связи с ликвидацией здания, в котором располагался регистратор. Летом-осенью 2006 г. после проведения рекогносцировочных работ были установлены станции KOS, PIT и KEM (рис. 9), а также станция ИФЗ РАН (В. Ю. Бурмин) GIR в пос. Гирвас.

Станция KOS установлена на территории школы в центре г. Костомукши. Две другие станции (KEM и PIT) расположены на территории компаний ОАО «Северо-западный Ростелеком» и «Радиотелевизионный передающий центр Республики Карелия», где существуют бесперебойное питание от сети и сохранность оборудования. Во всех случаях для датчиков оборудованы постаменты, связанные с выходом коренных пород.

Удаленный контроль работы станций (KEM, PIT, KOS) и передача данных осуществляются при помощи GPRS – модемов мобильных телефонов, связывающих станции с сетью Интернет. Значительным недостатком такого подключения оказывается то, что в часы высокой загруженности сети скорость передачи данных сильно падает и любые операции, проводимые со станцией удаленно, либо обрываются, либо обрабатываются очень медленно.

Регистрируемые события. Станции Карельской сети регистрируют в основном местные взрывы и локальные события в приграничных областях, на территории Архангельской, Ленинградской, Вологодской областей и Финляндии, Швеции. Кроме локальных событий Карельская сеть регистрирует и телесеismicкие события.

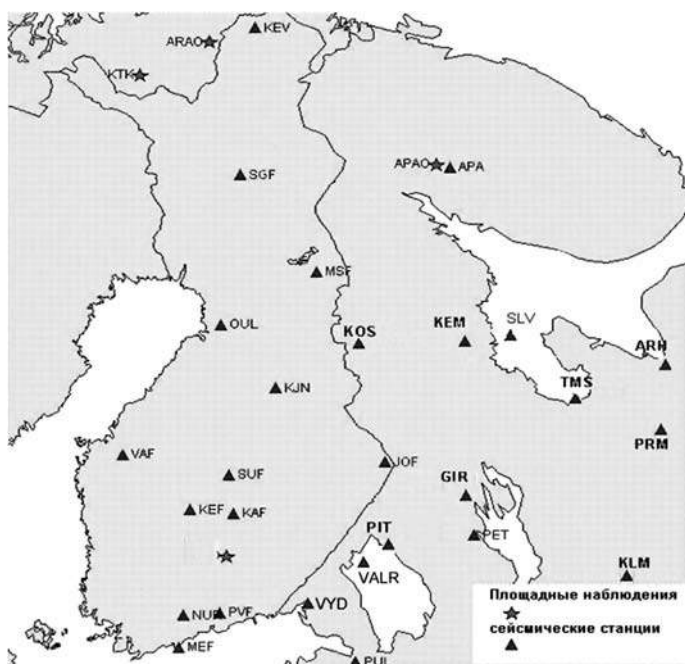


Рис. 9. Расположение сейсмостанций в Финляндии и на северо-западе России

Землетрясения на территории Карелии происходят крайне редко, раз в два года, и они небольшой интенсивности. 27 сентября 2008 г. сейсмостанциями КарНЦ РАН зарегистрировано землетрясение с магнитудой 2,4. Землетрясение произошло на севере Карелии, в районе озера Паанаярви.

Утилизация боеприпасов. В июне-сентябре 2010 г. передвижная сейсмостанция ИГ КарНЦ РАН в районе пос. Новая Вилга регистрировала сейсмоакустические воздействия на здания от уничтожения боеприпасов на военном полигоне. Были выбраны оптимальные заряды и удаление места взрыва от поселка, что позволило уничтожить отработавшие срок хранения боеприпасы без нанесения ущерба жителям. Наибольшее беспокойство населению доставляют звуковые волны от взрывов, так как импульсный сигнал от максимума спадает.

Промышленные взрывы. Для слабоактивной в сейсмическом отношении территории Карелии наиболее яркими сейсмическими событиями до сих пор являются карьерные взрывы. Исследования карьерных взрывов представляет особый интерес, связанный с возможностями решения на его основе многих сейсмологических задач (Землетрясения..., 2007). Для составления сейсмических каталогов в настоящее время используется изучение типовых характеристик сейсмических сигналов от многочисленных карьерных взрывов как источников помех при исследовании слабых местных землетрясений.

Частыми и регулярными событиями на наших записях являются *взрывы в карьере* г. Костомукши. Карьер ОАО «Карельский окатыш» – самый крупный железорудный карьер на территории республики. Взрывы в этом карьере мощные, до 1000 т, регулярные и производятся в одно и то же время (по средам и пятницам в 13 часов по местному времени). Общая масса короткозамедленного взрыва (заряда) достигает нескольких сотен тонн.

Менее регулярны на территории Карелии взрывы в 14 карьерах по добыче облицовочного камня и щебенки. Производство взрывных работ до 200 взрывов ежегодно на этих карьерах выполняет ООО «Карелвзрывпром». Общая масса заряда изменяется от 10 до 50 т.

Республика Карелия и прилегающие к ней территории плохо изучены в сейсмологическом плане, хотя именно здесь в случае возникновения землетрясений возможны наибольшие разрушения промышленных объектов, опасных в экологическом отношении, с соответствующими последствиями.

Возможно возникновение на этой территории слабых сейсмических событий с магнитудой до 3–4, которые способны спровоцировать в ослабленных зонах землетрясения с последующими разрушениями расположенных вблизи промышленных, транспортных и жилых объектов. При оценке сейсмической опасности территории основное внимание должно уделяться выделению и изучению зон сейсмической активности.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое геофизика?
2. Какие физические поля используются при геофизических исследованиях?
3. Бывают ли в Карелии землетрясения? Если да, то в каком районе?
4. Где на территории Карелии расположены сейсмологические станции?

Литература

- Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 373 с.
- Гутенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ, 1963. 263 с.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 381 с.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 378 с.
- Сергеев М. Б., Сергеева Т. В. Планета Земля. М.: Недра, 2000. 150 с.
- Федынский В. В. Разведочная геофизика. М.: Недра, 1967. 672 с.
- Шаров Н. В. Физика Земли: Учебное пособие. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 71 с.

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОХИМИИ

П. А. Лозовик

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

В лекции рассмотрены достижения по основным направлениям современной гидрохимии: химии природных вод, процессам формирования химического состава воды и нормированию допустимого антропогенного воздействия на водные объекты. Наряду с освещением мировых исследований по этим направлениям широко представлены результаты научных разработок лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. Цель лекции – показать существующие достижения и новые проблемы в гидрохимии.

Актуальность лекции заключается в рассмотрении основных вопросов гидрохимии и их значения для решения прикладных задач сохранения водных ресурсов.

Лекция может быть использована для студентов химических, биологических и экологических факультетов вузов, а также в школьном курсе химии.

Изложение материала

Гидрохимия как наука возникла на рубеже XIX и XX вв., когда стала актуальной проблема воды. Первыми исследователями воды были химики. *Гидрохимия – это наука, занимающаяся исследованием химического состава воды различных объектов гидросферы.* К объектам гидросферы относят:

- Поверхностные воды: воды рек, озер, водохранилищ, ледники, почвенные воды, т. е. воды, которые находятся на поверхности суши, и имеют непосредственный контакт с атмосферой. Их объем оценивается около 24 млн км³, но это в основном ледники (около 80 %).
- Морские воды – это воды морей и океанов. Их объем около 1,4 млрд км³.
- Подземные воды – это воды, находящиеся в пластах земли, и они не имеют контакта с атмосферой. Их количество составляет около 60 млн км³.
- Атмосферные осадки – это дождевые и снеговые воды. В целом для Земли это 830 мм/год, в Карелии – 600 мм/год. Меньше всего осадков выпадает в аридной зоне (100–150 мм/год).

Водные ресурсы имеют огромное значение для жизни людей – это прежде всего питьевое и хозяйственное водоснабжение, обеспечение водой промышленности, использование воды в сельском хозяйстве для орошения и полива. Неотенима их роль и в рекреации. Важна не только обеспеченность водными ресурсами тех или иных регионов, но и качество воды, используемой для водоснабжения.

Нельзя забывать и о важности водных ресурсов как источников добычи рыбы, моллюсков, креветок, крабов и других продуктов питания.

В связи с бурным развитием народонаселения встала остро проблема загрязнения водных ресурсов и борьба с их истощением и охраной.

Поэтому наукам, занимающимся водными проблемами, уделяется огромное внимание. И в этом плане особая роль отводится гидрохимии, которая занимается в первую очередь вопросами качества воды.

Какие же задачи решает гидрохимия?

Это прежде всего – изучение особенностей химического состава воды различных объектов гидросферы.

Второе – исследование процессов формирования химического состава природных вод.

Третье – оценка загрязнения водных объектов.

Четвертое – нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты и установление критических нагрузок на них.

Что же мы имеем сегодня в этих областях и что еще предстоит решить?

На данный момент достаточно хорошо изучен химический состав воды и его особенности различных объектов гидросферы. Появились даже отдельные направления в гидрохимии: морская ги-

дрохимия, гидрогеохимия, гидрохимия поверхностных вод, химия донных отложений, региональная гидрохимия. Получены данные по химическому составу воды многих водных объектов мира, установлена степень их загрязнения и возможность их использования для разных видов хозяйственной деятельности.

В настоящее время разработано много классификаций вод суши. В основном они носят экспертный характер, т. е. градация вод по тем или иным параметрам осуществляется по усмотрению специалиста. Следует отметить, что в странах ЕС разрабатывается рамочная директива, в которой также уделяется внимание классификации вод. Нами же разработана классификация поверхностных вод гумидной зоны, основанная на их кислотно-основном равновесии, и она строго обоснована с научной точки зрения, а не является экспертной. В природных водах гумидной зоны имеются две системы кислотно-основного равновесия: гумусная и карбонатная (Лозовик, 2007), с учетом которых удастся классифицировать воды по гумусности, щелочности и pH (Лозовик, 2013).

Градируя шкалу pH с шагом 0,6 ед., удается получить коэффициент перехода от одного класса гумусности (2,5) или щелочности (5) к другому. Кроме гумусности, щелочности и pH воды учитывается трофический статус водных объектов, устанавливаемый по содержанию $P_{\text{общ}}$ с учетом гумусности воды (рис. 1).

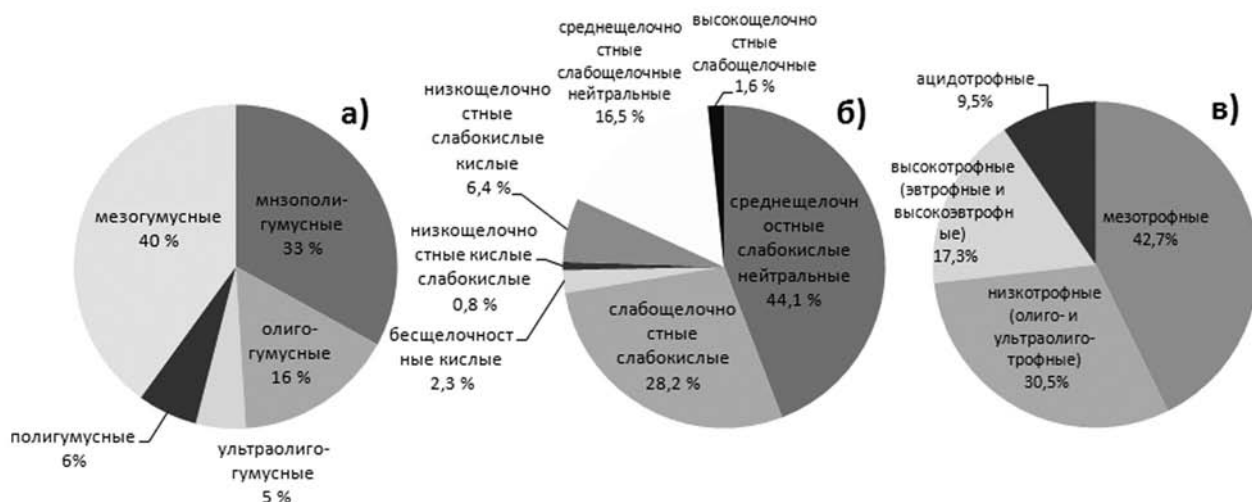


Рис. 1. Распределение водных объектов Карелии по гумусности (а), щелочности (б) и трофности (в)

Проведенная геохимическая классификация поверхностных вод Карелии (более чем 800 водных объектов) показала, что по щелочности и pH преобладают среднещелочные циркумнейтральные воды (около 60 %), по гумусности – мезогумусные (40 %) и мезополугумусные (33 %), а по трофии доминируют мезотрофные (43 %) и низкотрофные (31 %) водные объекты. Велика доля высокотрофных водоемов и водотоков (17 %). В регионе имеют место также ацидотрофные водные объекты, уровень трофии которых детерминирован pH воды.

Несмотря на большой задел в химии природных вод, до сих пор остаются малоизученными формы миграции элементов в объектах гидросферы, а также качественный и количественный состав ОВ природных вод. Решение этих вопросов имеет большое значение, поскольку влияние химических веществ на гидробионты во многом зависит от форм нахождения элементов и их соединений в воде.

Что касается ОВ природных вод, то здесь имеется очень много неизученных вопросов. Дело в том, что в составе ОВ природных вод насчитывается свыше 1000 индивидуальных химических соединений, анализ которых затруднен. Поэтому до сих пор пользуются косвенными показателями содержания ОВ: перманганатная окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), цветность, $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{орг}}$. Даже элементный состав ОВ затруднительно установить, поскольку мешающее влияние оказывает вода. Нами разработан расчетно-аналитический метод определения элементного состава и массы ОВ по ХПК, $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$ (Лозовик, 2006а).

Говоря об ОВ, необходимо отметить, что его давно подразделяют на две группы: автохтонное и аллохтонное.

Автохтонное ОВ образуется в самом водном объекте за счет протекания продукционно-деструкционных процессов, а аллохтонное ОВ поступает с водосборной территории и со сточными водами, сбрасываемыми в водоем. На сегодня нет надежных количественных методов их оценки, и используют косвенные характеристики. Следует отметить еще раз, что органическое вещество природных вод, как аллохтонное, так и автохтонное, это не индивидуальные соединения, а смесь соединений различной природы. Так, хорошо известно, что аллохтонное ОВ представлено гумусовыми веществами. А они, в свою очередь, относятся к высокомолекулярным соединениям нерегулярной структуры и ведут себя в воде как полиэлектролиты. В состав автохтонного ОВ входят такие лабильные соединения, как углеводы, липиды, белки, аминокислоты, летучие органические кислоты и др.

Имеется несколько качественных отличительных признаков автохтонного и аллохтонного ОВ:

- по способности окисляться перманганатом калия (автохтонное труднее, чем аллохтонное),
- по соотношению C : N (в автохтонном ОВ оно больше, чем в аллохтонном),
- по поглощению света в видимой области спектра. Еще Б. А. Скопинцев, известный советский гидрохимик, говорил: «Аллохтонное ОВ – это темный гумус, автохтонное ОВ – это светлый гумус».
- по способности окисляться биохимическим путем (аллохтонное биохимически трудноокисляемое, автохтонное – легкоокисляемое).

Проблема решения задачи заключается в том, что автохтонное и аллохтонное ОВ не имеют строго фиксированных значений вышеперечисленных параметров, они варьируются при изменении количественных и качественных характеристик ОВ. В лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН разработаны два новых метода оценки содержания автохтонного и аллохтонного ОВ:

– эмпирический: по ХПК и гумусности воды $\rho_{\text{авт}} = 0,62 \frac{\text{ХПК}}{\text{Hum}} - 0,35$ (Лозовик и др., 2007),

– химический: по адсорбции аллохтонного ОВ на ДЭАЭ-целлюлозе в динамическом режиме (Лозовик, Мусатова, 2013), которые согласуются между собой (см. ст. М. В. Зобковой в наст. сб.).

Оценка их содержания может быть выполнена и по кинетическим параметрам их трансформации.

Значительное внимание в гидрохимии уделяется исследованию донных отложений, особенно озерных. Если химия воды показывает состояние водного объекта на данный момент, то донные отложения отражают многолетнее воздействие на водоем. С одной стороны, донные отложения являются накопителями веществ, а с другой – отдают часть их в водную среду, создавая тем самым внутреннюю нагрузку на водоем (Белкина, 2011). Сейчас имеются модели ее расчета, но в то же время роль донных отложений в озерных экосистемах изучена слабо.

Что касается второй задачи гидрохимии – исследование процессов формирования химического состава природных вод, то здесь, прежде всего, надо сказать о самих процессах:

- 1) выпадение химических веществ с атмосферными осадками;
- 2) выщелачивание компонентов на водосборной территории;
- 3) внутриводоемные процессы.

Если рассматривать первый и второй процессы применительно к поверхностным водам Карелии, то установлены следующие закономерности (рис. 2) (Лозовик и др., 2005).

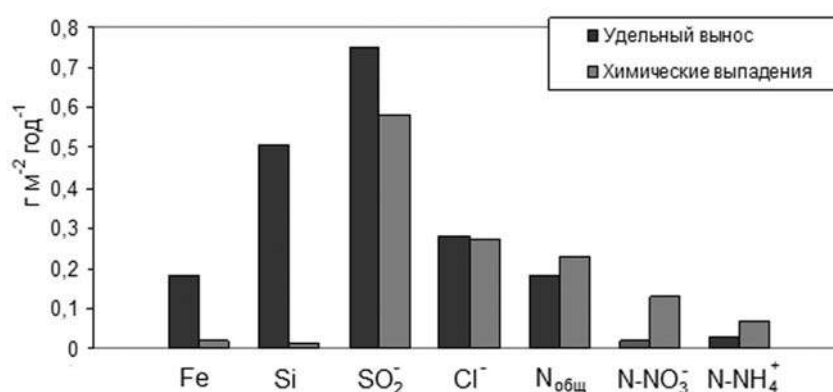


Рис. 2. Выпадения и удельный вынос химических веществ на территории Карелии

Поступление в поверхностные воды Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Fe, Mn, Al всецело обусловлено выщелачиванием этих компонентов на водосборной территории, Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- – почти на 100 % атмосферными осадками, SO_4^{2-} , $\text{P}_{\text{общ}}$ – атмосферными осадками и водосбором. Нами установлена важная закономерность – равенство и постоянство $\text{N}_{\text{общ}}$ (0,4 мг/л) во всех объектах гидросферы, не подверженных загрязнению (Лозовик, Бородулина, 2009). Единственное отличие объектов по этому элементу – это разное соотношение форм N.

Поступление веществ в водные объекты связано с геологическим строением водосборной территории, составом почв и подстилающих пород. Чтобы установить, в какой степени они отражаются на химическом составе воды, требуется проведение углубленных исследований в этом направлении.

Внутриводоемные процессы, играющие важную роль в водных экосистемах, можно разделить на три группы:

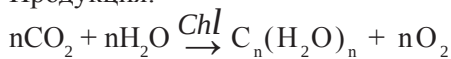
1) Трансформация веществ в водных объектах (окисление, седиментация и захоронение в донных отложениях);

2) Круговорот веществ в водных экосистемах. К примеру, БЭ

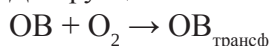


3) Продукционно-деструкционные процессы.

Продукция:



Деструкция:



Что касается трансформации веществ, то давно было замечено, что в озерах, особенно с замедленным водообменом, концентрация некоторых веществ в их воде намного меньше, чем в приточных водах. Было введено даже понятие «удерживающая способность водоемов»:

$$R = \frac{C_{\text{пр}} - C_{\text{оз}}}{C_{\text{пр}}},$$

где $C_{\text{пр}}$ – средняя концентрация вещества в приточных водах, $C_{\text{оз}}$ – в озере (или в истоке из озера).

В дальнейшем были получены эмпирические зависимости R от периода водообмена озер. В основном они касались фосфора общего как основного лимитирующего БЭ (Dillon, Rigler, 1974; Vollenweider, 1975).

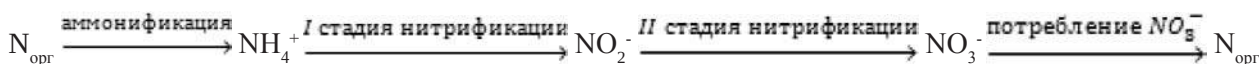
Нам же удалось теоретически установить строгую зависимость R от периода водообмена озер (τ) и константы скорости трансформации веществ (k) в природных водах (Лозовик, Рыжаков, 2009):

$$R = \frac{k\tau}{1 + k\tau e^{-1/\tau}}$$

Зная R и τ для озер, можно вычислить k , что и было сделано для многих веществ: $\text{P}_{\text{общ}}$, Fe, ОВ, $\text{N}_{\text{орг}}$, Si, Cu, и впервые получить важнейшие геохимические константы трансформации этих веществ в поверхностных водах (Лозовик и др., 2011; Белкина и др., 2012). Надо отметить, что скорости трансформации веществ в поверхностных водах очень низкие. Об их интенсивности можно судить по времени полупревращения ($\tau_{1/2}$), т. е. времени, за которое концентрация вещества уменьшится в 2 раза. Это время для указанных групп веществ составляет 1–4 года.

Круговорот веществ в водных экосистемах имеет огромное значение, особенно это касается биогенных элементов (N, P, Si). Благодаря ему обеспечиваются потребности в минеральных формах БЭ живых организмов (бактерио- и фитопланктона).

Если рассматривать круговорот N, то он выглядит следующим образом:



Перед нами фактически имеется циклическая цепь последовательных реакций первого порядка. Используя теорию этих реакций в химии, А. В. Рыжакову удалось установить кинетические параметры этих реакций, протекающих в водных объектах (Рыжаков и др., 2010).

В результате протекания продукционно-деструкционных процессов происходит образование автохтонного ОВ.

Для характеристики продукции и деструкции в водных объектах разработан принципиально новый метод, основанный на кинетике БПК и на показателях автохтонного ОВ ($\rho_{\text{авт}}$, $k_{\text{авт}}$) (Лозовик, 2014):

$$P = \rho_{\text{авт}} \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}} \cdot (e^{k_{\text{авт}}} - 1)$$

$$D_{\text{общ}} = \text{БПК}_{\text{полн}} (1 - e^{-K})$$

$$D_{\text{авт}} = \rho_{\text{авт}} \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}} \cdot (1 - e^{-k_{\text{авт}}})$$

$$(\text{ОВ})_{\text{новообр}} + \text{O}_2 = P - D_{\text{авт}} = \rho_{\text{авт}} \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}} \cdot (e^{k_{\text{авт}}} + e^{-k_{\text{авт}}} - 2),$$

где P – продукция, $D_{\text{общ}}$ – общая деструкция, $D_{\text{авт}}$ – деструкция автохтонного ОВ, $\rho_{\text{авт}}$ – доля автохтонного ОВ, $k_{\text{авт}}$ – константа скорости окисления автохтонного ОВ, K – константа скорости потребления кислорода.

До настоящего времени определение продукции и деструкции осуществлялось и осуществляется классическим методом Винберга: по изменению содержания O_2 в склянках на свету и в темноте. В чем проблема при использовании метода Винберга? Дело в том, что в склянках в темноте мы имеем деструкцию ОВ, которое накопилось в водоеме к моменту постановки опытов, а на свету – отражается фотосинтез, который имел место на момент постановки опытов, а что было до этого, мы не знаем. Путем компьютерной обработки данных кинетики БПК удастся установить $\text{БПК}_{\text{полн}}$ и K , а вычислить $k_{\text{авт}}$ можно по уравнению (Лозовик, 2012):

$$k_{\text{авт}} = \frac{\rho K - k_{\text{алл}}}{\rho_{\text{авт}}} + k_{\text{алл}},$$

где $\rho = \text{БПК}_{\text{полн}} / \text{ХПК}_{\text{исх}}$, $k_{\text{алл}}$ – константа скорости окисления аллохтонного ОВ (0,0007 сутки⁻¹ в зимний период, 0,0013 сутки⁻¹ – в период открытой воды). Опыты по кинетике БПК проводятся при двух температурах: 20 °С и 10 °С, что позволяет установить температурный коэффициент скорости реакции (или коэффициент Вант-Гоффа). И далее, используя этот коэффициент, с учетом среднесезонной температуры воды в водных объектах, удастся получить продукцию и деструкцию ОВ in situ.

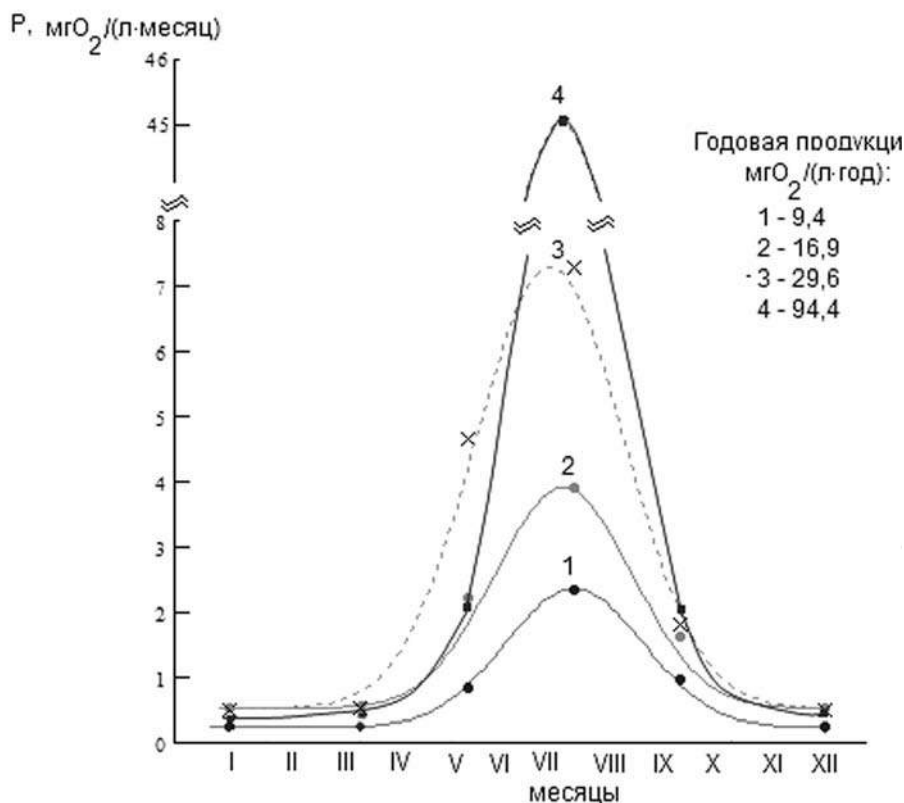


Рис. 3. Распределение первичной продукции по сезонам 2012 г. для олиготрофных озер (Вегарусъярви, Вендюрское, Урос и Урозеро) (1), мезотрофных (Салонъярви, Яндомозеро и Валгомозеро) (2) и эвтрофных (Крошнозеро (3) и Святозеро, в котором наблюдалось цветение воды (4))

Осуществив интегрирование сезонной продукции, мы можем установить годовую продукцию и годовую деструкцию (рис. 3). Новый метод позволяет более надежно определить эти характеристики для водных объектов, чем метод Винберга.

Как отмечалось вначале, третье направление в гидрохимии связано с оценкой загрязнения водных объектов.

На сегодня загрязнение вод является одной из самых острых проблем современности. Все меньше и меньше остается чистой воды. И в этой связи требуется весьма квалифицированная оценка степени загрязнения водных объектов. В настоящее время имеется много методических подходов оценки загрязнения воды. В основном в них используется сравнение наблюдаемых концентраций с ПДК для рыбохозяйственных водоемов. В России имеется официально утвержденный документ, по которому оценивается загрязнение воды путем расчета комбинаторных индексов загрязнения воды (КИЗВ), удельных КИЗВ (УКИЗВ) и количества загрязняющих веществ (РД 52.24.643-2002). Здесь имеется большая проблема, связанная с геохимическими особенностями отдельных территорий. Так, для поверхностных вод Карелии характерно, что для ряда веществ $C_{\text{фон}} \ll \text{ПДК}$ (NH_4^+ , NO_3^- , Cd, Pb, Ni и др.), для других $C_{\text{фон}} \approx \text{ПДК}$ (нефтепродукты, Zn, Cu), для третьих $C_{\text{фон}} > \text{ПДК}$ (Fe, Mn, фенолы). Поэтому воды с низким геохимическим фоном элементов могут попадать в разряд «чистых», а с высоким – в «грязные». Для исключения этого противоречия нами предложено использовать региональные предельно допустимые концентрации (РПДК) (Лозовик, Платонов, 2005):

$\text{РПДК} = \sqrt{C_{\text{фон}} \cdot \text{ПДК}}$ – для веществ, у которых $C_{\text{фон}} \ll \text{ПДК}$,

$\text{РПДК} = C_{\text{фон}} + \text{ПДК}$ – для веществ, у которых $C_{\text{фон}} \approx \text{ПДК}$.

Для веществ, у которых $C_{\text{фон}} > \text{ПДК}$, оценка РПДК не представляется возможной, и в этом плане требуется проведение специальных исследований.

После установления РПДК рассчитывается региональный индекс загрязнения воды:

$\text{ИЗВ}_{\text{рег}} = \frac{1}{n} \sum \frac{C_i}{\text{РПДК}_i}$, как это делалось ранее с использованием ПДК (Методические рекомендации..., 1988):

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{6} \sum \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$$

Вещества, у которых $C_{\text{фон}} > \text{ПДК}$, в таких расчетах не принимаются во внимание.

Применительно к карельским водным объектам такая оценка загрязнения вод дает более объективную картину их состояния, и она согласуется с данными гидробиологических наблюдений (Галахина, Лозовик, 2014).

В настоящее время стоит проблема, как же поступать с веществами, у которых $C_{\text{фон}} > \text{ПДК}$. В данном случае предстоит выполнить химико-токсикологическое моделирование, как ранее было выполнено по отношению ионов K^+ (Лозовик, Дубровина, 1998). И, по-видимому, РПДК этих веществ будет разным для различных геохимических классов вод.

Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты и установление критических нагрузок на них. Это направление в гидрохимии имеет большое значение, поскольку важно знать возможности водных объектов противостоять их загрязнению. В этой связи необходимо вспомнить проблему закисления природных вод, которая очень активно дебатировалась в 80–90-х гг. прошлого столетия. Особенно популярна эта тема была у наших соседей – в Финляндии. В завершение этих исследований даже вышла тысячестраничная монография «Acidification in Finland» (1990). Идеологом этих работ был шведский ученый Хенриксон, который ввел понятие критических кислотных нагрузок и предложил способ их оценки на основе кислотно-нейтрализующей способности природных вод (Henriksen et al., 1992). Сложность методики Хенриксона заключается в том, что требуется определение суммы главных катионов, которая была в воде в доиндустриальный период. Поскольку установить ее экспериментально невозможно, то и проверить расчетные данные не представляется возможным. Мы тоже заинтересовались решением этой проблемы, но пошли другим путем, учитывая, что устойчивость водных объектов к закислению оценивается буферной емкостью их воды (Лозовик, Потапова, 2006). Предложили экспериментальный метод ее определения. Закисляющее воздействие атмосферных осадков зависит от гидрологических параметров водных объектов (периода водообмена и удельного водосбора) (Лозовик, 2006б) (рис. 4).

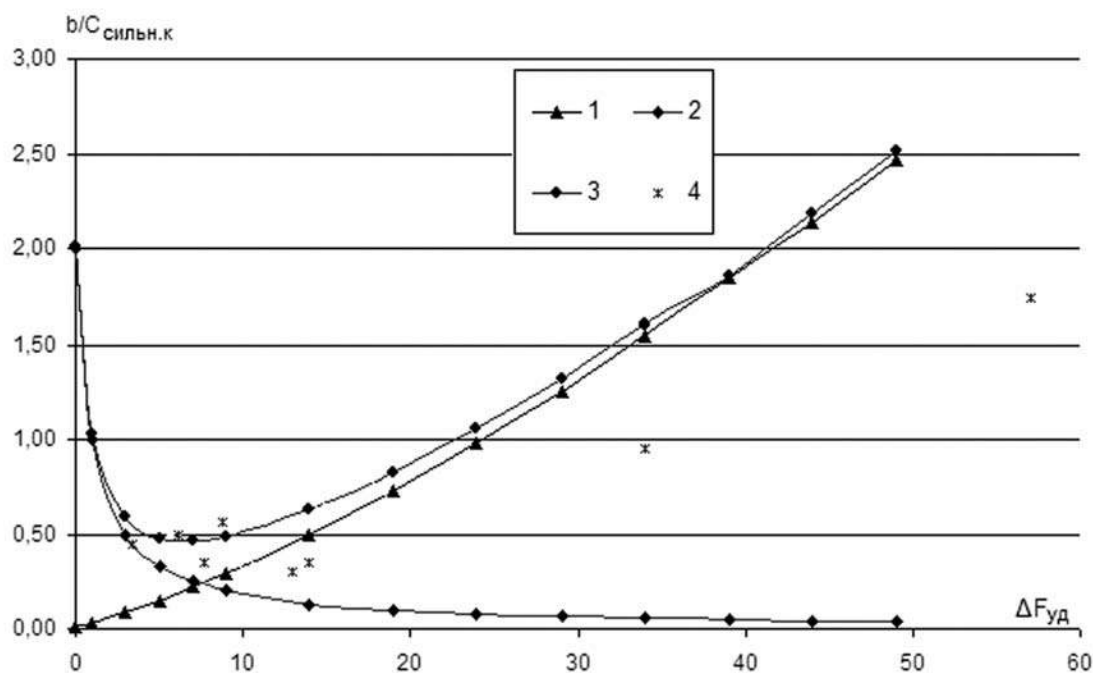


Рис. 4. Зависимость максимального поступления сильных кислот в озера от удельного водосбора:

1 – в период весеннего половодья, 2 – за счет осадков на поверхность озера, 3 – суммарное (1+2),
4 – суммарное по прямому расчету

Количество сильных кислот, которое поступает в водный объект, оценивается по формуле:

$$b = C_{\text{сильн.к.}} (0,4 / \tau + 2 \Delta F_{\text{уд}}^{-1}),$$

а критическое их количество вычисляется по буферной емкости (β) и по допустимому изменению pH ($\Delta \text{pH}_{\text{limit}}$): $b_{\text{крит.}} = \beta \cdot \Delta \text{pH}_{\text{limit}}$

$$\beta = \ln 10 \cdot \frac{[\text{Alk}] \cdot [\text{Acid}]}{[\text{Alk}] + [\text{Acid}]},$$

где τ – период водообмена, $[\text{Alk}]$ – щелочность, $[\text{Acid}]$ – кислотность воды.

Критическая концентрация сильных кислот в атмосферных осадках будет равна:

$$C_{\text{крит}} = b_{\text{крит}} \cdot \rho^{-1},$$

где ρ – доля вод весеннего половодья и осадков, выпадающих на поверхность озера.

Сегодня в России согласно приказу Минприроды осуществляется нормирование допустимого сброса (НДС) загрязняющих веществ со сточными водами (Приказ..., 2007). Нормативы по НДС устанавливаются для всех предприятий, которые сбрасывают в водные объекты сточные воды. Если сброс воды находится в пределах НДС, то взимается плата за загрязнение среды по обычному тарифу, если превышает – то вводятся повышающие коэффициенты.

В чем недостаток существующей официальной методики? Фактически расчет НДС осуществляется исходя из принципа, чтобы концентрация загрязняющего вещества была на уровне ПДК в контрольном створе с учетом кратности разбавления сточных вод в этой точке. Так вот, если предприятие сбрасывает свои сточные воды в малопроточный водоток с низкой кратностью разбавления сточных вод, то НДС будет небольшой, а если в высокопроточный (в крупную реку), то НДС будет большим. В первом случае предприятие будет платить намного больше, чем во втором, хотя и сбрасывается одно и то же количество загрязняющих веществ.

Что мы предлагаем в этом случае? Прежде всего антропогенное влияние на водные объекты необходимо подразделять на евтрофирование и загрязнение. Первое приводит к повышению биопродуктивности объекта и связано с избыточным поступлением БЭ (P, N) и ОВ. Второе обусловлено поступлением токсичных веществ, что вызывает загрязнение водной среды.

В первом случае для нормирования сброса БЭ и ОВ может быть использована ассимиляционная способность водного объекта в природном состоянии $((As)_{\text{прир}})$. Она определяется как произведение скорости трансформации $(C_{\text{фон}} \cdot k)$ на годовой объем водного стока из водного объекта $(V_{\text{стока}})$:

$$(As)_{\text{прир}} = C_{\text{фон}} \cdot k \cdot V_{\text{стока}} (\tau + 1).$$

Благодаря тому, что нам удалось найти метод определения констант скоростей трансформации лабильных веществ, удалось установить и ассимиляционную способность водного объекта. На величину ассимиляционного потенциала в природном состоянии может быть и увеличена антропогенная нагрузка на водоем. Применительно к Онежскому и Ладожскому озерам допустимая антропогенная нагрузка по $P_{\text{общ}}$ составляет 660 и 3380 т в год соответственно. Онежское озеро достигло уровня допустимой фосфорной нагрузки, а в Ладожском озере наблюдается снижение содержания $P_{\text{общ}}$ в связи с уменьшением внешней фосфорной нагрузки.

Наряду с указанным методом нормирования фосфорной и органической нагрузки может быть выполнено на основе принципа сохранения геохимического класса вод. Результаты по обоим методам практически одинаковые, хотя они и принципиально разные.

При загрязнении оценивается количество загрязненных вод (КЗВ), которое определяется как произведение $ИЗВ_{\text{рег}}$ на объем годового стока из водоема:

$$КЗВ = ИЗВ_{\text{рег}} \cdot V_{\text{стока}}.$$

При этом не имеет принципиального значения, по какому объекту считать, результат будет одинаковым, как и в случае расчета КЗВ непосредственно для сбрасываемых сточных вод. За допустимое количество загрязненных вод (ДКЗВ) принимается такой их объем, когда $ИЗВ_{\text{рег}} = 1$. Фактически он равен объему годового стока с водного объекта. При этом ДКЗВ будет разное для различных водных объектов, принимающих сточные воды. Применительно к Костомукшскому ГОКу количество загрязненных вод в системе р. Кенти оценивается в 455 млн м³/год, а допустимое – 56 млн м³/год. Превышение допустимого уровня достигает 399 млн м³/год.

Преимущества новой методики нормирования очевидны, но ее нельзя использовать, поскольку она официально не утверждена, и требуется проведение работ в этом направлении по экологическому менеджменту.

Говоря о достижениях и о дальнейшем развитии гидрохимии, необходимо отметить и работы в области компьютерных технологий и в аналитической химии по анализу воды. В настоящее время много отдельных программ, позволяющих проводить обработку и анализ гидрохимических данных. Но все они касаются отдельных моментов, а не всех вопросов от состава до нормирования.

В этой связи необходимо отметить автоматизированную информационную систему «АИС Гидрохимия» М. Б. Зобкова – молодого ученого, работающего в нашей лаборатории, который попытался объединить все аспекты, существующие на сегодняшний день в гидрохимии (Зобков, 2012).

Многие достижения в гидрохимии стали возможны благодаря развитию методов анализа воды. Сегодня у гидрохимиков имеются современные аналитические приборы: спектрофотометры, хроматографы, атомно-абсорбционные спектрометры, масс-спектрометры с индуктивно связанной плазмой, хромато-масс-спектрометры и многие другие. И они позволяют решать сложные задачи при оценке качества воды и его изменений. В настоящее время в стране введена аккредитация аналитических лабораторий. Создано агентство «Росаккредитация». В анализах воды используются аттестованные методики. В то же время следует отметить, что в нашей стране не имеется специализированного научного учреждения, занимающегося разработкой методик для анализа воды. Разработку РД по методам анализа осуществляет Гидрохимический институт Роскомгидромета, но в основном в них закладываются старые методики и мало новых. В нашей лаборатории имеются новые аналитические разработки:

- определение Cl^- с $Hg(CNS)_2$ и $Fe(NO_3)_3$;
- определение SO_4^{2-} с $BaCl_2$ и сульфоназо III (Кулакова и др., 2013);
- определение лигносульфонатов методом дифференциальной УФ-спектроскопии (Лозовик, Кафлюк, 2005);

- расчетно-аналитический метод определения элементного состава ОВ природных вод (Лозовик, 2006а);
- фотометрический персульфатный метод определения $C_{орг}$ (Зобков, Мусатова, 2014);
- определение HCO_3^- с поправкой на анионы органических кислот (Лозовик, 2005);
- определение смоляных кислот по реакции Либермана-Бухарда.

Разработанные методики имеют явные преимущества по сравнению с существующими и требуется их аттестация.

Достоверность химических анализов воды осуществляется путем внутреннего и внешнего контроля. Последний проводится в рамках международного проекта «ICP-Waters», проводимого норвежским институтом исследований вод NIVA. Получено хорошее соответствие наших результатов международным стандартам (Intercomparison..., 2014).

Заключение

В заключение отмечу, что гидрохимия призвана решать сложные проблемы современности, и я думаю, что она с этим успешно справится. Для решения этих задач требуются квалифицированные специалисты. Из классических специальностей больше всего подходят для работы в гидрохимии химии и геохимии.

Достаточно хорошее применение находят и физики и математики-программисты. В этой связи не могу не вспомнить выпускников ПетрГУ, физиков, рано ушедших из жизни, А. М. Глинского и Ю. В. Таланова. Успешно работала у нас и математик О. Ф. Шкиперова. Не могу не отметить работающих ныне физиков М. Б. Зобкова и Ю. Ф. Дмитриеву. М. Б. Зобковым успешно защищена диссертация по геоинформатике (технические науки).

К сожалению, в РК прекращена подготовка химиков в связи с ликвидацией кафедры химии в бывшей КГПА бывшим ее руководством. И вскоре в республике встанет острая проблема нехватки не только учителей по химии, но и специалистов для большого числа химико-аналитических лабораторий.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные задачи решает гидрохимия и на что они направлены?
2. Какие основные процессы обуславливают формирование химического состава природных вод и к чему они приводят?
3. Какие методы используются для оценки загрязнения вод?
4. Каким образом осуществляется нормирование допустимого сброса сточных вод? Какие недостатки существующей методики и что предлагается взамен?
5. Сформулируйте перспективные направления исследований в современной гидрохимии.

Литература

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Тр. КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 35–41.

Белкина Н. А., Вапиров В. В., Лукин А. А. и др. Медь в экосистеме Онежского озера // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всерос. симпозиума с междунар. участием. 10–14 сент. 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 93–97.

Галахина Н. Е., Лозовик П. А. Методические подходы оценки загрязнения водных объектов в зоне действия предприятий горнодобывающей промышленности // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 4. С. 429–438.

Зобков М. Б. Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 21 с.

Зобков М. Б., Мусатова М. В. Патент РФ №148307 МПК G01N33/18, на полезную модель «Устройство для определения органического углерода в воде». 2014.

Кулакова Н. Е., Лозовик П. А., Родькина И. С. Количественное определение содержания сульфат-ионов в природных водах на основе реакции комплексообразования ионов бария с сульфатами III // Вестник Моск. гос. обл. ун-та, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 52–56.

Лозовик П. А. Оценка вклада анионов органических кислот в щелочность природных гумусных вод // Журнал аналитической химии. 2005. Т. 60, № 11. С. 1126–1130.

- Лозовик П. А. Расчетно-аналитический метод оценки содержания и элементного состава органического вещества природных вод // Журнал аналитической химии. 2006а. Т. 61, № 6. С. 592–597.
- Лозовик П. А. Устойчивость водных объектов к закислению в зависимости от их удельного водосбора на примере озер и рек бассейна р. Шуи (Онежской) // Водные ресурсы. 2006б. Т. 33, № 2. С. 188–194.
- Лозовик П. А. Кислотно-основное равновесие поверхностных вод гумидной зоны // Геохимия. 2007. № 10. С. 1139–1144.
- Лозовик П. А. Органическое вещество и биогенные элементы как показатели функционирования водных экосистем // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всерос. симпоз. с междунар. участием. 10–14 сент. 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 361–366.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–588.
- Лозовик П. А. Оценка продукционно-деструкционных характеристик водных объектов по кинетическим параметрам окисления органического вещества // Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології: Матеріали шостої всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю 20–22 травня 2014. Дніпропетровськ (Україна), 2014. С. 182–185.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- Лозовик П. А., Дубровина Л. В. Влияние соотношения катионов и минерализации воды на токсичность ионов калия // Экологическая химия. 1998. Т. 7, № 4. С. 243.
- Лозовик П. А., Кафлюк А. Е. Применение метода дифференциальной уф-спектроскопии для определения лигниновых веществ в загрязненных водах // Журнал аналитической химии. 2005. Т. 60, № 9. С. 938–943.
- Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник Моск. гос. обл. ун-та, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.
- Лозовик П. А., Платонов А. В. Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. 2005. № 6. С. 527–532.
- Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В. Внутриводоемные процессы трансформации и накопления лабильных веществ в озерных системах // Материалы науч.-практ. конф. (с междунар. участием) «Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России», г. Азов, 8–11 июня 2009 г. Ростов-на-Дону, 2009. Ч. 1. С. 124–127.
- Лозовик П. А., Басов М. И., Литвиненко А. В. Оценка поступления химических веществ в гидрографическую сеть с водосборной территории Карелии // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 584–588.
- Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б. и др. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Тр. КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 21–28.
- Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям № 250-895 от 21.07.1988 г. СПб.: Гидрометеиздат.
- Рыжаков А. В., Кукконен Н. А., Лозовик П. А. Определение интенсивности аммонификации и нитрификации в природных водах кинетическим методом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 1. С. 70–74.
- Приказ № 333 МПР РФ от 17.12.2007 «Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей».
- РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям: Метод. указания. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 50 с.
- Acidification in Finland / Eds. P. Kauppi, P. Anttila, K. Kenttämies. Helsinki: Springer Verlag, 1990. 1237 p.
- Dillon P. I., Rigler F. N. A test of simple nutrients budget model predicting the phosphorus concentrations in lake water // J. Fish. Res. Board Can. 1974. Vol. 31. 11. P. 1771–1778.
- Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A. Critical loads of Acidity: Nordic Surface Waters // AMBIO. 1992. 21. P. 356–363.
- Intercomparison 1428: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn // Norwegian Institute for Water Research, Oslo, September 2014. 88 p.
- Vollenweider R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in Limnology // Schweiweir. Z. Hydrol. 1975. Bd. 37, N 1. P. 53–84.

АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ БИОТЫ В ВОДОЕМАХ КАРЕЛИИ

Н. М. Калинкина¹, М. Т. Сярки¹, А. В. Рябинкин¹, Т. С. Шелехова²

¹ *Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

² *Институт геологии КарНЦ РАН*

В статье рассматриваются основные абиотические факторы (низкая температура, слабая минерализация воды, пониженное содержание общего фосфора), оказывающие лимитирующее воздействие на биоту водоемов Карелии и определяющие их низкую продуктивность. Показано, что распределение глубоководных озер и встречающихся в них реликтовых ракообразных приурочено к Центрально-Карельской зоне активных разломов. На примере озер Заонежского полуострова установлено, что отсутствие лимитирующего влияния дефицита натрия, кальция и магния в воде приводит к увеличению размеров и массы моллюсков глубоководного бентоса. Увеличение содержания фосфора в воде происходит в условиях воздействия на водоемы сельского хозяйства, в последние годы и товарного рыбоводства, что вызывает эвтрофирование водных экосистем. Региональные особенности водоемов Карелии (низкую способность к самоочищению) необходимо учитывать при их использовании в хозяйственных целях.

Введение

Карелия представляет собой уникальный озерный край, требующий изучения и рационального использования водных ресурсов (Современное состояние..., 1998; Водные ресурсы..., 2006; Состояние водных объектов..., 2007). Озера Карелии характеризуются многообразием водосборных территорий, что вызывает варьирование физико-химического состава воды озер и рек, а также отражается на видовом богатстве и показателях обилия водных организмов.

Особенности биоты водоемов Карелии определяются следующими главными абиотическими факторами: климатом, химическим составом воды и донных отложений, а также антропогенным воздействием. Климат Карелии характеризуется как переходный от морского к континентальному, по условиям образования он принадлежит к атлантико-арктической зоне умеренного пояса (Назарова, 2010). Во все сезоны года отмечается неустойчивый режим погоды. Типичными чертами климата Карелии являются продолжительные и относительно теплые зимы, короткое и прохладное лето. В северной части Карелии средние годовые температуры воздуха составляют 0,2–0,4 °С, в центральных районах – 1,2–1,5 °С, в южных районах – 1,8–2,5 °С (Назарова, 2013).

Среди показателей химического состава воды для водных организмов важнейшими являются: содержание биогенных веществ (главным образом, фосфора), органического вещества, сумма и состав ионов, содержание загрязняющих веществ и газовый режим (содержание кислорода). По минерализации поверхностные воды Карелии относятся к ультрапресным. Для карельских водоемов, не подверженных антропогенному воздействию, характерны низкие концентрации общего фосфора (Лозовик и др., 2013). В то же время содержание органического вещества, имеющего аллохтонное происхождение, в большинстве озер Карелии повышено, что связано с высокой заболоченностью водосборных территорий. Не случайно, что высокая цветность воды большинства водоемов в Карелии является причиной ее низкого качества для питьевого водоснабжения (Водные ресурсы..., 2006). Большинство водных объектов Карелии свойственна неполная насыщенность воды кислородом, что объясняется повышенным содержанием органического вещества, на деструкцию которого затрачивается кислород (Лозовик и др., 2013).

Водоемы Карелии находятся под воздействием следующих основных типов источников загрязнения: целлюлозно-бумажные комбинаты (располагаются на побережье Онежского, Ладожского озер и Выгозерского водохранилища), коммунально-бытовые сточные воды (наиболее крупные источники – города Петрозаводск, Кондопога, Сегежа, Медвежьегорск, Питкяранта). В последние годы в Карелии интенсивно развивается товарное рыбоводство. Карелия является лидером в России по садковому выращиванию радужной форели, объемы производства которой в настоящее время достигли 12 000 тонн в год (Ильмаст, 2012).

Рассмотренные абиотические факторы, характерные для Карелии (короткий вегетационный период, невысокая летняя температура, чрезвычайно низкая минерализация воды, низкие концентрации биогенных веществ, антропогенное воздействие), неблагоприятны для большинства водных организмов и лимитируют их развитие. Следствием влияния этих факторов является в целом низкая продуктивность водоемов Карелии. Исключение составляют те более продуктивные водные экосистемы, на которые перечисленные факторы по разным причинам (природным или антропогенным) не оказывают лимитирующего влияния.

Цель настоящей работы – рассмотреть влияние основных абиотических факторов на развитие биоты в водоемах Карелии. Задачи, которые решали для достижения цели, – дать краткую характеристику важнейших для биоты абиотических факторов водоемов Карелии (минерализация воды, содержание общего фосфора); рассмотреть распределение на карте Карелии глубоководных озер и встречающихся в них реликтовых ракообразных; рассмотреть трофический статус водоемов Карелии по показателям зоопланктона и зообентоса в связи с лимитирующим воздействием абиотических факторов.

Материалы статьи могут быть использованы учителями и учащимися старших классов общеобразовательных школ, в подготовке абитуриентов и студентов эколого-биологического и агротехнического факультетов по дисциплинам: экология, гидробиология, лимнология.

Лимитирующие факторы и пределы толерантности

Факторы среды влияют на организм, и это влияние ограничено диапазоном толерантности, который у каждого вида характеризуется своими пределами. У каждого организма свой диапазон оптимальных условий существования (Протасов, 2011).

Рост, размножение, фотосинтез, первичная продукция, размер популяции часто регулируются одним или немногими факторами или компонентами, находящимися в недостатке, тогда как другие ресурсы могут частично недоиспользоваться. Этот принцип называется законом минимума Ю. Либиха. Сходная концепция предложена В. Шелфордом – закон толерантности. Согласно этой концепции, любой фактор – или в слишком больших, или в слишком малых количествах – может оказаться вредным для популяции.

Графики зависимости каких-либо количественных оценок свойств популяции (приспособленность, выживание, эффективность добывания пищи) от важнейших факторов среды известны под названием кривых толерантности и обычно имеют колоколообразную форму (Пианка, 1981). Вершина колоколообразной кривой отвечает условиям, оптимальным для данного процесса, а ветви кривой соответствуют пределам толерантности.

Если в качестве исследуемого фактора использовать концентрации химических элементов в среде обитания (почве, воде), то можно предложить следующую схему регуляторных процессов организма в зависимости от концентрации вещества (Колчинский, 1990). На рис. 1 представлены диапазоны содержания химического элемента, при которых наблюдается нормальная регуляция процессов или нарушение функций организма.

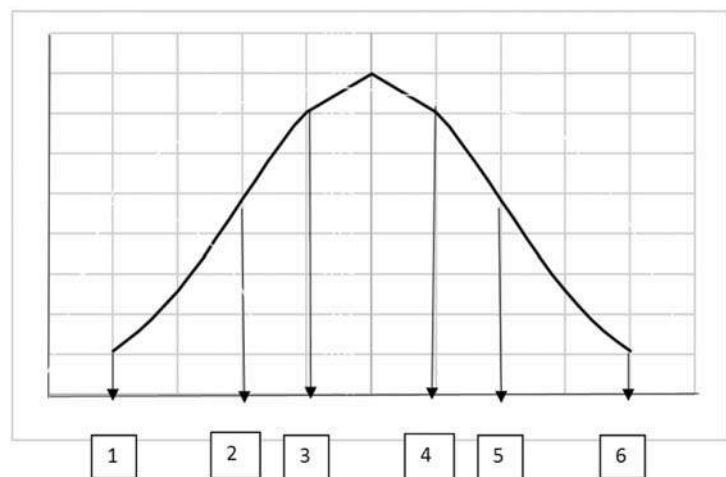


Рис. 1. Общий вид кривой толерантности организма к фактору среды:

по оси абсцисс – условные концентрации химического элемента; по оси ординат – степень приспособленности организма

Точка 1 на рисунке соответствует состоянию в условиях дефицита химического элемента, при котором наблюдается наибольшая степень угнетенности организма вплоть до его гибели, т. е. обозначает нижний предел толерантности организма к данному фактору среды. Точка 2 называется «нижняя пороговая концентрация», при которой существование организма возможно, однако его приспособительные возможности напряжены. Точки 3 и 4 ограничивают интервал нормальных концентраций, при которых степень приспособленности организма наивысшая и условия его существования оптимальные. Точка 5 называется «верхняя пороговая концентрация», при которой организм выдерживает повышение концентрации элемента, однако адаптационные возможности находятся на пределе. Точка 6 отражает состояние избытка химического элемента, при котором наступает гибель организма, т. е. это верхний предел толерантного диапазона. В пределах концентраций химических элементов между нижним и верхним пороговыми уровнями (2–5) наблюдается нормальная регуляция физиологических процессов. За ее пределами происходит нарушение функций, вызываемое избытком или недостатком элементов.

Для некоторых видов характерны очень острые пики кривых толерантности, иллюстрирующие узкий ее диапазон. Узкие диапазоны толерантности наблюдаются у стенобионтов, т. е. видов, выдерживающих небольшие колебания каких-либо факторов среды (стенофаг – узкий пищевой спектр, стеногалинный вид – выдерживает узкий диапазон солёности). Другим видам свойственны плавные кривые, соответствующие широкому диапазону толерантности. Широкие диапазоны толерантности обычно обозначают приставкой эври-, т. е. эврибионтные формы (эвритермный – выдерживает широкий диапазон температур, эвригалинный – широкий диапазон солёности и пр.).

В настоящей работе рассмотрена реакция биоты водоемов Карелии (на примере зоопланктона и бентоса) на действие таких лимитирующих факторов, как общая минерализация воды и содержание фосфора.

Материал и методы

Материалом для исследований послужили архивные данные Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (Озера Карелии. Справочник, 2013) по 166 водоемам, расположенным в Северной, Средней и Южной Карелии, собранные в период 1960–2008 гг. В основу данной работы был положен массив данных, который включал морфометрические показатели (максимальная глубина озер Карелии) (Филатов и др., 2013); гидрохимические показатели: ионный состав воды, содержание общего фосфора (Лозовик и др., 2013); гидробиологические данные: численность и биомасса зоопланктона (Куликова, 2013) и бентоса (Рябинкин, Полякова, 2013). Современные данные по макрозообентосу водоемов Вендюрской группы и Заонежского полуострова были получены в ходе комплексных полевых исследований в июне, августе 2011 г. и июне, июле, августе 2012 г.

Минерализация воды и показатели сообществ макрозообентоса водоемов Карелии

К настоящему времени выполнена детальная классификация водоемов Карелии по гидрохимическим показателям (Лозовик и др., 2005; Лозовик, 2006, 2013). В этих работах было использовано большое количество химических показателей (минерализация, pH, гумусность, фосфор и другие), что позволило выделить 13 классов озер. При этом для определения каждого отдельного класса требовалось использовать весь спектр исходных показателей.

В число наших задач входила классификация озер по отдельным показателям, наиболее значимым для биоты. Такими показателями, в частности, являются минерализация воды (имеет большое значение для регуляции водно-солевого баланса водных организмов) и содержание общего фосфора (при низких концентрациях лимитирует развитие биоты). По показателям ионного состава воды озер на основе кластерного анализа было выделено три группы озер, среднее содержание суммы ионов которых составило, соответственно, 13, 25 и 71 мг/л. В каждой группе средние значения показателей различаются достоверно ($p < 0,05$).

На геологической карте Карелии представлено расположение озер, принадлежащих к трем группам (рис. 2).

По содержанию ионов самые минерализованные водоемы (первая группа, представлены на карте кружками зеленого цвета) расположены в пределах кварц-карбонатных пород, известняков, доломитов, шунгитовых сланцев и аргиллитов (Заонежье), а также вулканических пород главным образом основно-

го состава (габбро-долеритов, базальтов). Преобладающими формами рельефа являются денудационно-тектонический крупно- и среднегрядовый, реже мелкогрядово-холмистый. Четвертичные отложения представлены глинисто-алевритовыми осадками и маломощной песчано-супесчаной мореной.

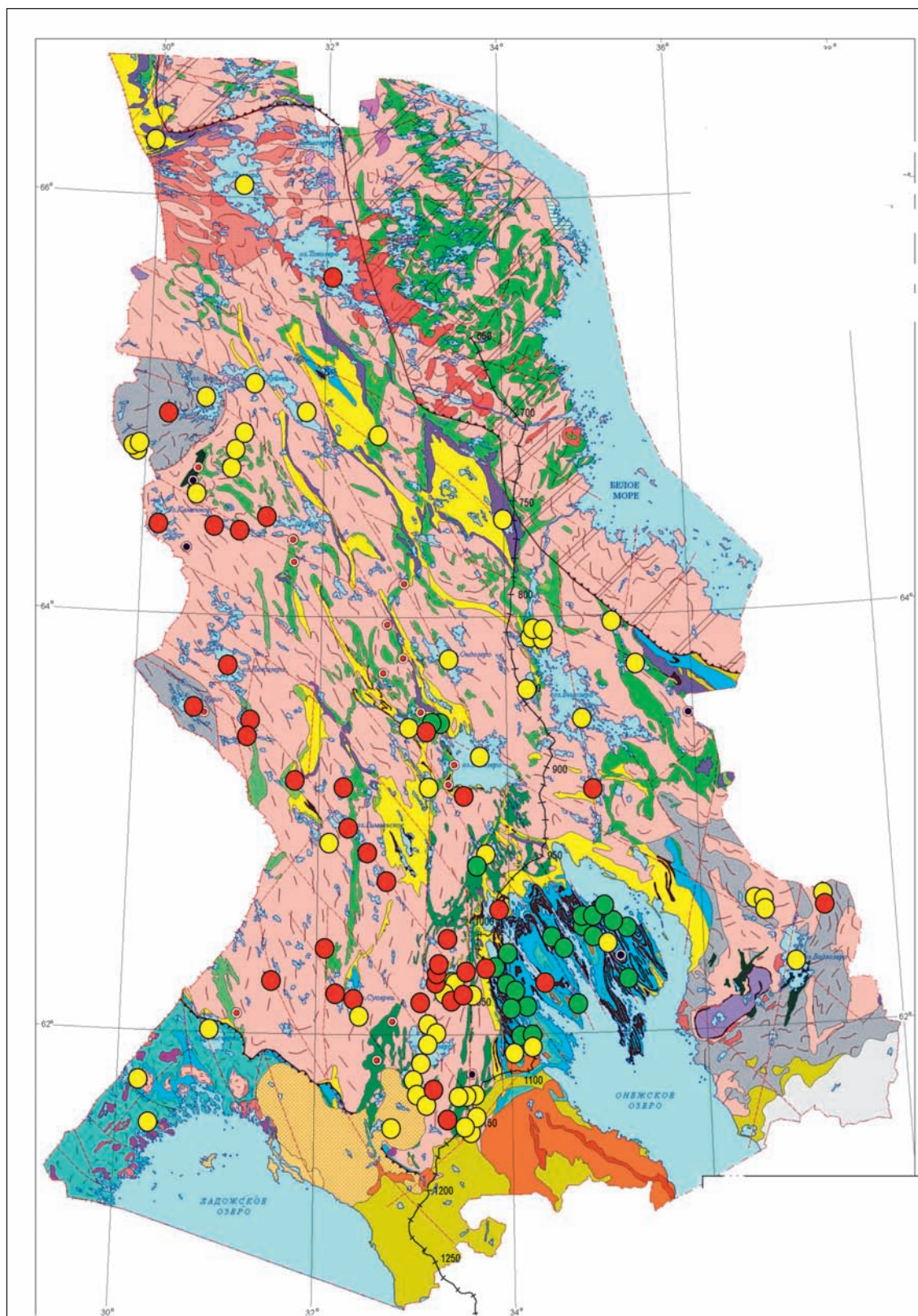


Рис. 2. Расположение озер с разной суммой ионов на геологической карте Карелии (объяснения в тексте)

Озера второй группы со средней минерализацией воды (представлены кружками желтого цвета) расположены в пределах различных вулканитов, гранитоидов с включением мафитов, кристаллических сланцев (углеродсодержащих), редко – гранитов-рапакиви. Аккумулятивные формы рельефа представлены краевыми образованиями, ледораздельными возвышенностями, моренными, озерно-ледниковыми и водно-ледниковыми равнинами с мощностью осадков 10–15 м.

Озера третьей группы с наименьшей минерализацией воды (представлены кружками красного цвета) расположены в пределах гнейсо-гранитов, мигматитов с реликтами вулканитов, гранитоидов. Они приурочены к водно-ледниковым формам рельефа (озам, дельтам и др.), сложенным сортированным отмытым песчано-гравийно-галечным материалом, и реже – к моренным абрадированным равнинам, мощность отложений составляет 10–20 м.

Сходное пространственное распределение по классам минерализации было обнаружено и для подземных вод. Согласно результатам исследований Г. С. Бородулиной (2006), можно выделить три основные группы подземных вод. При этом автор отмечает, что при формировании минерализации подземных вод большое значение имеет не только состав пород, но и время пребывания воды в системе порода – вода, т. е. гидродинамический фактор. Минимальные величины общей минерализации подземных вод приурочены к архейским гранито-гнейсовым полям Западно-Карельской возвышенности. Низкая минерализация подземных вод здесь определяется частой сменяемостью порций вод при их продвижении от центральных частей водораздела к местному базису эрозии. В восточной части Карелии обнаруживаются несколько более минерализованные подземные воды за счет возрастания времени взаимодействия в системе порода – вода. Воды с повышенной минерализацией отмечены в породах Онежской мульды, где встречаются первично-глинистые, карбонатные, вулканические, вулканогенно-осадочные, а также чрезвычайно характерные для этого комплекса углеродсодержащие породы. В этой группе отмечается наибольшее разнообразие подземных вод по химическому составу.

Таким образом, гидродинамический фактор (время контакта атмосферных осадков с породами) и собственно состав пород определяют показатели суммы ионов и ионный состав поверхностных и подземных вод на территории Карелии.

С целью изучения связей между минерализацией воды озер Карелии и показателями биоты осуществляли корреляционный анализ. Оказалось, что связь между разными группами озер по минерализации и показателями общей численности и биомассы зоопланктона и зообентоса отсутствует. Коэффициенты корреляции были недостоверными ($p > 0,05$). Это объясняется тем, что пределы минерализации в озерах Карелии (10–200 мг/л) входят в толерантный диапазон для организмов зоопланктона и зообентоса и не лимитируют их развитие в водоемах Карелии. Возможный дефицит важнейших ионов (главным образом, натрия) водные организмы пополняют за счет потребления пищи.

Однако структура сообществ макрозообентоса оказалась связана с минерализацией воды озер. Для выявления связей между минерализацией воды и показателями структуры макрозообентоса были выбраны две группы водоемов. Озера Вендюрской группы (с меньшей минерализацией воды) включают: Урос (сумма ионов 8,83 мг/л), Голубая ламба (3,14 мг/л), Рапсудозеро (12,75 мг/л) и Коверьярви (13,9 мг/л).

Вторая группа озер, которая характеризуется более высокой минерализацией воды, расположена на Заонежском полуострове: Мягрозеро (сумма ионов 110,65 мг/л), Гижозеро (33 мг/л), Леликозеро (16,35 мг/л) и Кондозеро (13,74 мг/л) (Закономерности изменения..., 2013).

Сравнительный анализ структуры сообществ макрозообентоса озер Заонежья показал, что в них, в отличие от вендюрских озер, существенную роль играют моллюски. В озерах Заонежья их удельный вес в сообществах варьирует по численности от 21–33 % в озерах Гижозеро и Кондозеро до 68 % в озерах Мягрозеро и Леликозеро, по биомассе – от 32 до 55 %. В большинстве же вендюрских озер, за исключением оз. Урос, эта группа бентоса отсутствует (табл. 1).

Вместе с тем средняя индивидуальная масса одной особи Mollusca в оз. Урос (Вендюрская группа) составляет 1,2 мг, что почти в два раза ниже, чем в озерах Заонежья, – 2,3 (1,7–3,5) мг (см. табл. 1). Это связано с более низкими величинами общей минерализации в озерах Вендюрской группы по сравнению с озерами Заонежья (особенно с оз. Мягрозеро).

Таблица 1

Структура макрозообентоса озер Заонежья и Вендюрской группы по основным систематическим группам (2011–2012 гг.)

Водоем	N	B	Oligochaeta			Mollusca			Chironomidae			W, мг	Число видов
			N	B	w	N	B	w	N	B	w		
Мягрозеро	795	1,40	0	0	0	68	46	2,3	31	46	1,4	1,9	23
Леликозеро	783	1,16	21	19	1,2	41	55	1,8	36	30	1,0	1,4	15
Гижозеро	399	1,38	4	3	1,2	21	32	3,5	61	41	5,6	3,5	15
Кондозеро	200	0,21	25	4	0,1	33	54	1,7	30	39	0,8	1,1	10
Урос	384	0,73	11	4	0,6	31	21	1,2	57	25	0,8	1,9	26
Рапсудозеро	850	4,05	0	0	0	0	0	0	35	62	11,7	4,6	21
Коверъярви	1024	2,64	2	1	1,1	0	0	0	91	86	2,4	2,6	24
Голубая ламба	1417	3,84	0	0	0	0	0	0	97	87	2,7	3,0	20

Примечание. N – численность (экз./м²); B – биомасса (г/м²); W – средний вес (мг/м²); w – индивидуальный вес (мг/м²).

Пресноводные животные постоянно поддерживают во внутренней среде концентрацию минеральных веществ (натрия, кальция и других) на уровнях, в сотни и тысячи раз превышающих эти показатели в пресной воде. Потребности в натрии пресноводные животные, в основном, обеспечивают за счет поступления ионов с пищей. Потребность в кальции обеспечивается за счет поглощения из воды. Транспорт кальция из внешней среды играет ведущую роль в поддержании кислотно-щелочного гомеостаза пресноводных организмов (Виноградов, 2000). При повышенной минерализации воды в озерах Мягрозеро и Гижозеро кальций поступает в организмы моллюсков в достаточных количествах, что отразилось на их более высоких показателях (весе и размерах). Кальций необходим для построения раковин у моллюсков. Достаточное содержание кальция в озерах Заонежья обеспечивает развитие у них крепкой раковины, в то время как у моллюсков в водоемах с низкой минерализацией обнаруживаются более тонкие раковины.

Глубоководные водоемы и реликтовые ракообразные

Для реликтовых ракообразных, которые проникли в водоемы Карелии из приледниковых озер примерно 10 000 лет назад (Кауфман, 2011), решающее значение для выживания имеет температура воды. При этом оптимальные значения их температурных толерантных диапазонов смещены в сторону пониженных значений (Сушня и др., 1986). Именно поэтому реликтовые ракообразные преимущественно встречаются на дне в водоемах с наибольшими глубинами. Это объясняется тем, что в летний период, в связи с температурной стратификацией, в глубоководных зонах озер сохраняется пониженная температура, пригодная для выживания реликтовых рачков.

К числу наиболее распространенных бентосных реликтовых ракообразных относятся: *Pallasea quadrispinosa* Sars, *Monoporeia affinis* (Lindstr.), *Mysis relicta* Lovén (рис. 3). Вид *Relictacanthus lacustris* (Sars) встречается гораздо реже. На фотографии (см. рис. 3) представлен экземпляр, отловленный в центральной части Онежского озера в августе 2014 г. (географические координаты 61°636' с. ш., 35°477' в. д.; глубина 54 м).

В некоторых озерах доля реликтовых рачков в общих показателях численности и биомассы глубоководного бентоса может достигать высоких значений (табл. 2).

Таблица 2

Показатели численности и биомассы реликтовых рачков в некоторых озерах Карелии

Озеро	Максимальная глубина, м	Численность реликтовых рачков, экз./м ² (% от общей численности бентоса)	Биомасса реликтовых рачков, г/м ² (% от общей биомассы бентоса)
Пяозеро	49	703 (79)	0,925 (74)
Путкозеро	42	5240 (60)	7,886 (62)
Маслозеро	75	559 (29)	0,828 (41)
Пюхяярви	26	33 (13)	0,089 (29)
Сегозеро	103	22 (8)	0,066 (16)
Ладмозеро	52	118 (16)	0,217 (12)

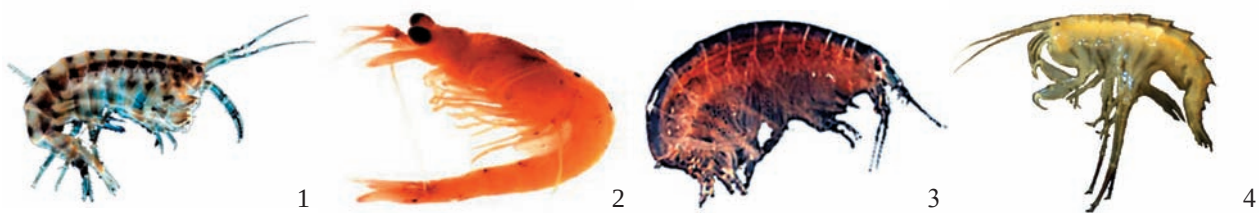


Рис. 3. Некоторые бентосные реликтовые ракообразные, встречающиеся в водоемах Карелии:

1 – *Pallasea quadrispinosa* Sars, 2 – *Mysis relicta* Lovén, 3 – *Monoporeia affinis* (Lindstr.), 4 – *Relictacanthus lacustris* (Sars)

Распространение бентосных реликтовых рачков в озерах Карелии представлено на рис. 4. Озера с наибольшими максимальными глубинами, где были встречены реликтовые рачки (на карте помечены красными кружками), располагаются в наибольшей близости к оси, вытянутой в северо-западном направлении. Исключение составляет оз. Янисъярви, расположенное в северном Приладожье.

Озера с меньшими глубинами (на карте помечены зелеными кружками) примыкают к наиболее глубоководным озерам, но площадь их распределения вдоль оси в целом больше.

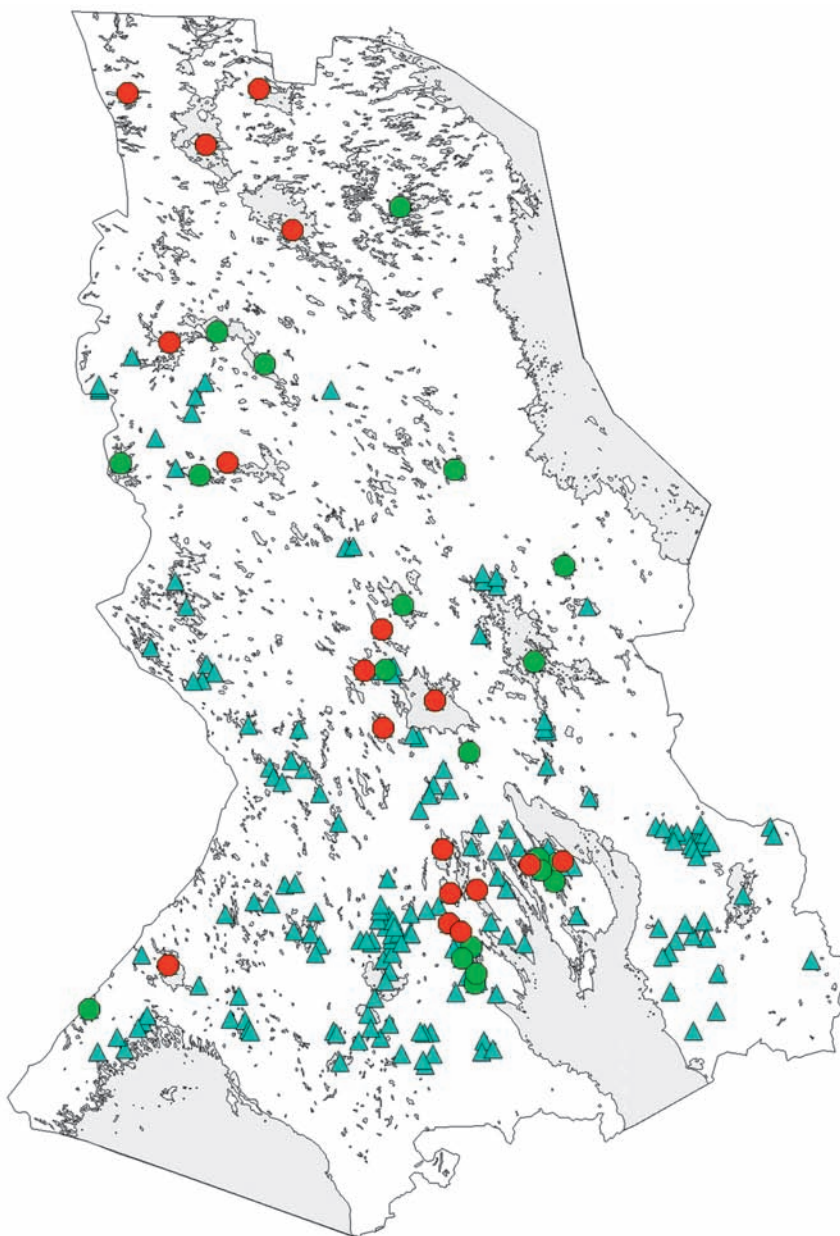


Рис. 4. Расположение на карте Карелии озер (красные и зеленые кружки), в которых встречаются реликтовые ракообразные; красными кружками отмечены озера с максимальной глубиной 40 м и более; зелеными кружками – озера с глубиной от 40 до 18 м; отсутствие реликтовых ракообразных в озерах обозначено голубыми треугольниками

Было выполнено сопоставление расположения на карте Карелии озер с наибольшими максимальными глубинами и наиболее глубокими зонами в Онежском озере (рис. 5). В глубоководных зонах Онежского озера также обитают реликтовые ракообразные. Как оказалось, все точки на карте легли вблизи одной оси северо-западного направления (за исключением оз. Янисъярви).

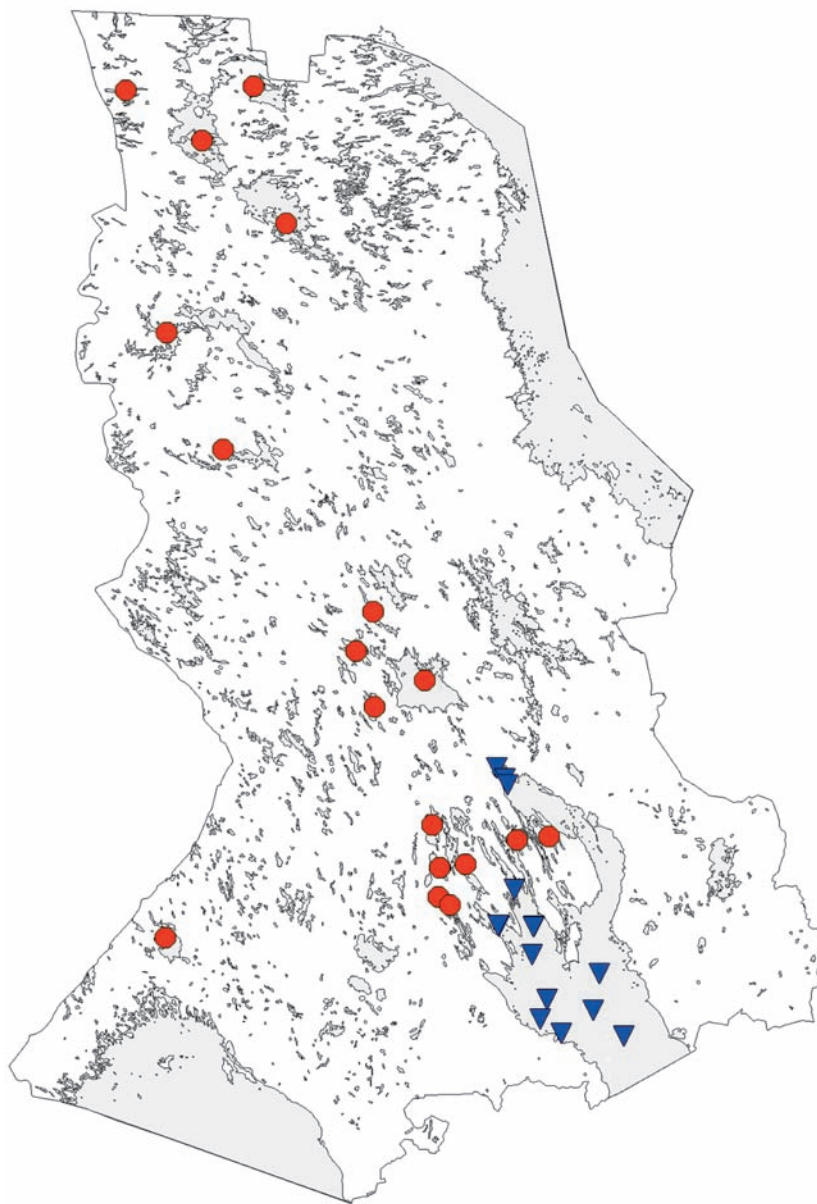


Рис. 5. Расположение озер с максимальными глубинами (40–128 м), где были встречены реликтовые ракообразные (красные кружки), и точек с максимальными глубинами (40–104 м) в Онежском озере (синие треугольники)

Сопоставление картины по распространению реликтовых рачков в озерах Карелии, в том числе в Онежском озере, с материалами по геологическому строению изучаемого региона, а именно, с данными по геодинамике показало, что глубокие озера, где обитают рачки, приурочены к Центрально-Карельской зоне активных разломов, разграничивающей крупные блоки земной коры с различной направленностью и интенсивностью движений (Лукашов, 2004). Эта зона имеет северо-западное простирание, протяженность ее достигает десятки и первые сотни километров. Центрально-Карельская зона дифференцированных движений сопряжена с мобильно-проницаемыми зонами Карельского мегаблока. Вследствие повышенной трещиноватости тектонический разлом представляет собой водоносную зону с растворенными в ней солями и газами, выделяющимися по зонам разломов из-под коровых глубин. Возможно, на распределение рачков в глубоких озерах Карелии влияет не только низкая температура, формирующаяся на дне в летний период, но и поступающие из подстилающих пород микроэлементы.

Содержание общего фосфора и показатели зоопланктона в водоемах Карелии

Содержание общего фосфора в озерах Карелии изменяется в пределах 2–204 мкг/л, средняя медианная концентрация составляет 16 мкг/л (Лозовик, 2013). Озера Карелии были разделены на три группы в соответствии с критериями, предложенными С. П. Китаевым (2007). К первой группе (олиготрофные озера) были отнесены водоемы, в которых содержание общего фосфора было 25 мкг/л и менее. Вторая группа (мезотрофные) характеризовалась содержанием в воде общего фосфора в пределах от 25 до 50 мкг/л; третья группа – эвтрофные (более 50 мкг/л).

Расположение озер, относящихся к трем группам, представлено на рис. 6: по содержанию общего фосфора большинство водоемов Карелии характеризуются олиго-мезотрофным статусом. Водоемы первой и второй групп приурочены в основном к северной и средней частям Карелии. Наибольшее содержание общего фосфора отмечается в озерах Южной Карелии, где в 1980-е гг. было развито сельскохозяйственное производство. Именно с отходами животноводческих ферм, с сельскохозяйственных полей в водоемы поступали биогенные элементы, в том числе и фосфор. В настоящее время сельское хозяйство в Карелии во многом утратило свое значение, однако водоемы сохранили признаки его влияния в относительно недалеком прошлом.

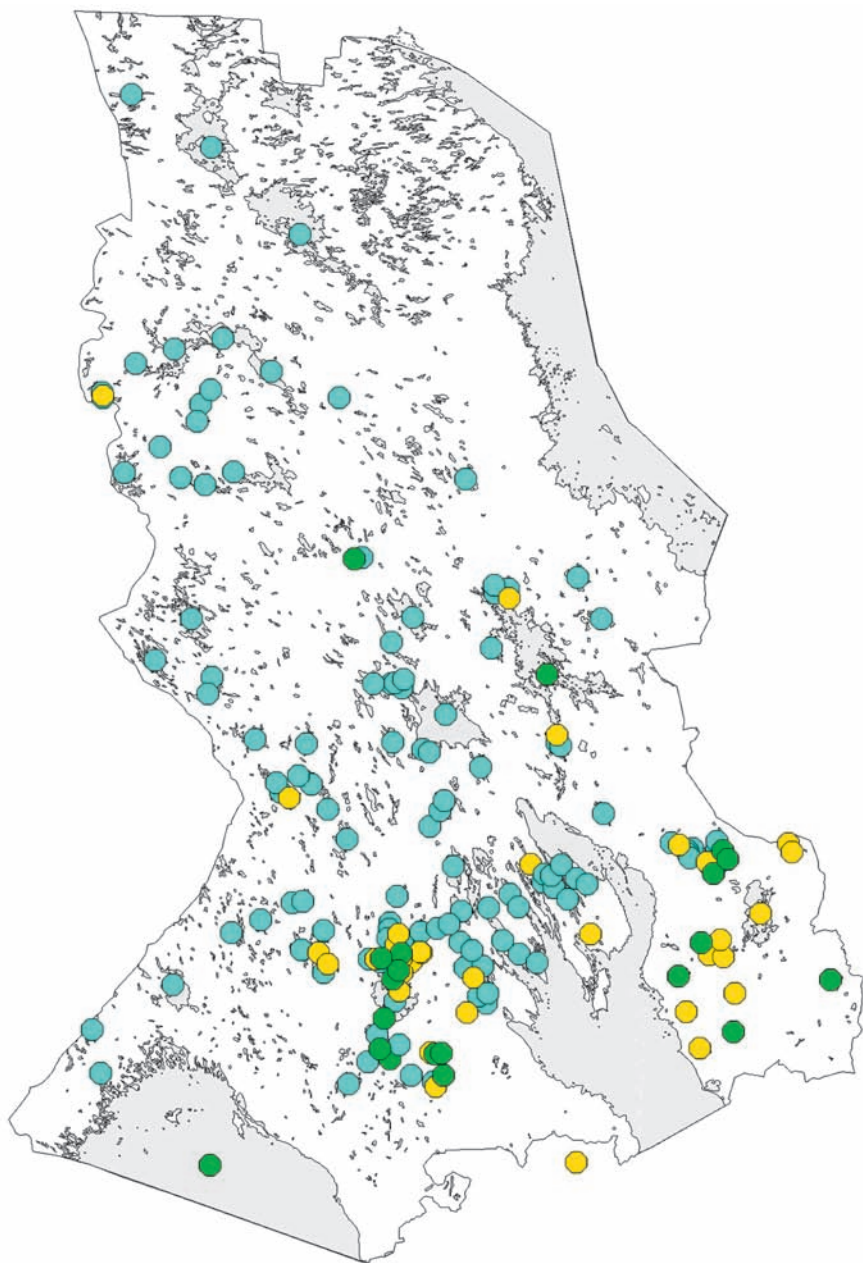


Рис. 6. Расположение на карте Карелии озер с различным содержанием в воде общего фосфора; голубые кружки – олиготрофные озера; желтые кружки – мезотрофные; зеленые кружки – эвтрофные озера (объяснения в тексте)

Фосфор – это важнейший гидрохимический показатель, определяющий развитие биоты. Представляло интерес рассмотреть связи между показателями содержания фосфора и биоты. С этой целью озера Карелии были классифицированы по величине биомассы зоопланктона на три группы, согласно критериям, предложенным С. П. Китаевым (2007). В первую группу были отнесены озера, в которых биомасса зоопланктона составляла менее 1 г/м³ (олиготрофные). Во вторую группу включены озера, характеризующиеся показателями биомассы зоопланктона от 1 до 4 г/м³ (мезотрофные). Третья группа озер – эвтрофные, для которых показатели биомассы зоопланктона превышали величину 4 г/м³. Расположение трех групп озер представлено на рис. 7.

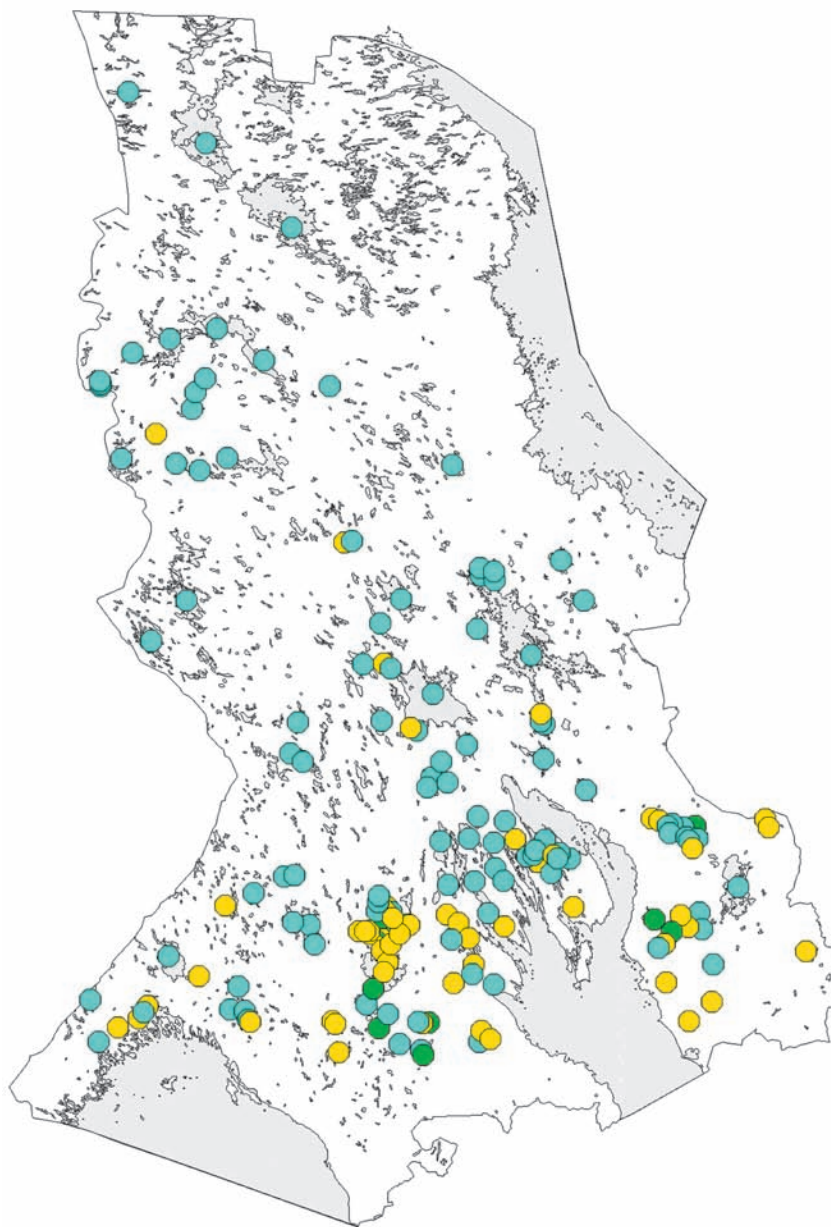


Рис. 7. Расположение на карте Карелии озер с различными показателями биомассы зоопланктона; голубые кружки – олиготрофные озера; желтые кружки – мезотрофные; зеленые кружки – эвтрофные озера (объяснения в тексте)

Расположение озер разной трофности по показателям зоопланктона во многом повторяет картину распределения озер на карте Карелии по показателям содержания общего фосфора (см. рис. 6). При статистической обработке данных были получены достоверные положительные коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) между показателями содержания общего фосфора в воде и показателями биомассы зоопланктона. Этот факт объясняется закономерностями трофических связей в экосистеме водоемов. Рост концентрации фосфора в воде ведет к усилению развития фитопланктона, который, в свою очередь, вызывает повышение количества зоопланктона.

Заключение

Карелия широко известна своими многочисленными озерами и реками (Водные ресурсы..., 2006). Большинство водоемов Карелии имеют низкую продуктивность, что объясняется климатическими характеристиками региона и его геохимическими особенностями. Низкая температура воды, невысокое содержание в воде минеральных веществ, в том числе биогенных элементов, – вот основные факторы, которые определяют весьма невысокие показатели развития биоты в озерах Карелии, в том числе низкую рыбопродуктивность.

Из всех изученных в настоящее время глубоководных озер Карелии (Озера Карелии. Справочник, 2013) подавляющее их большинство приурочено к Центрально-Карельской зоне разломов, которая имеет северо-западное простирание. Встречаемость в этих озерах реликтовых ракообразных объясняется низкой температурой придонных слоев воды в летний период, а также, возможно, поступлением из зоны разломов микроэлементов.

Анализ бентоса озер Заонежского полуострова показал, что достаточные концентрации основных катионов (натрия, кальция, магния и других), особенно кальция, благоприятно сказываются на жизнедеятельности моллюсков. По сравнению с моллюсками из других маломинерализованных озер Карелии они отличаются крупными размерами, большим весом и крепкими раковинами.

Концентрация общего фосфора – один из важнейших факторов, определяющих развитие биоты в озерах Карелии. Большая часть озер Карелии имеет олиготрофный характер и малую продуктивность. Отдельные примеры повышения трофности озер при увеличении содержания общего фосфора объясняются повышенной антропогенной нагрузкой. В последние десятилетия нагрузка от сельскохозяйственного земледелия уменьшилась, зато значительно увеличились объемы товарного рыбобоводства. Увеличение концентрации фосфора и изменение трофического статуса водоемов ведет к утрате естественного биоразнообразия, ухудшению качества вод, потере рыбохозяйственного значения и рекреационной ценности.

Необходимо отметить, что для большинства озер Карелии, в том числе и для великого Онежского озера, характерны малые скорости не только продукционных, но и деструкционных процессов. Это определяет низкую способность этих водоемов к самоочищению, а значит, их высокую уязвимость к загрязнению. В связи с этим при использовании водоемов Карелии в хозяйственных целях во внимание должны быть приняты не только общероссийские стандарты качества воды и водопользования, но и особые региональные критерии состояния водных экосистем.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое лимитирующие факторы?
2. Раскройте смысл закона минимума Ю. Либиха.
3. В чем суть закона толерантности В. Шелфорда?
4. Что такое кривая толерантности организма к факторам среды?
5. Назовите основные факторы, лимитирующие развитие биоты в водоемах Карелии. Какова причина их лимитирующего воздействия?

Литература

Бородулина Г. С. Качество подземных вод // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 127–144.

Виноградов Г. А. Процессы ионной регуляции у пресноводных рыб и беспозвоночных. М.: Наука, 2000. 216 с.

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркюя и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 263 с.

Закономерности изменения озерных экосистем в различных ландшафтах Восточной Фенноскандии: озера Вендюрской группы и Заонежья. Отчет о научно-исследовательской работе по теме 72. № гос. регистрации 01201155831. Петрозаводск, 2013. Т. 1. 105 с.

Ильмаст Н. В. Рыбное население пресноводных экосистем Карелии в условиях хозяйственного освоения: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2012. 44 с.

Кауфман З. С. Некоторые вопросы формирования фауны Онежского и Ладожского озер // Тр. КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 64–76.

- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Колчинский Э. И. Эволюция биосферы. Л.: Наука, 1990. 236 с.
- Куликова Т. П. Зоопланктон // Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 51–53.
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 58 с.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–592.
- Лозовик П. А., Басов М. И., Зобков М. Б. Поверхностные воды Заонежского полуострова. Химический состав воды // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 35–46.
- Лозовик П. А., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Химический состав озерных вод // Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 30–36.
- Лукашов А. Д. Геодинамика новейшего времени // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н. В. Шарова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 150–191.
- Назарова Л. Е. Климат // Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 75–76.
- Назарова Л. Е. Климат и озера // Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 22–23.
- Пианка Э. Эволюционная экология. М.: Мир, 1981. 400 с.
- Протасов А. А. Жизнь в гидросфере. Очерки по общей гидробиологии. М.: Академперіодика, 2011. 704 с.
- Рябинкин А. В., Полякова Т. Н. Макрозообентос // Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 54–55.
- Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. / Отв. ред. Н. Н. Филатов, Т. П. Куликова, П. А. Лозовик. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.
- Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Отв. ред. П. А. Лозовик, Т. П. Куликова, Н. Н. Мартынова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.
- Сущеня Л. М., Семенченко В. П., Вежновец В. В. Биология и продукция ледниковых реликтовых ракообразных. М.: Наука и техника, 1986. 160 с.
- Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Потахин М. С. Гидрографические особенности водоемов // Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 15–21.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ И РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В МЕЛКОВОДНОМ БОРЕАЛЬНОМ ОЗЕРЕ

Г. Э. Здоровеннова, Н. И. Пальшин, Р. Э. Здоровеннов,
Т. В. Ефремова, Г. Г. Гавриленко, А. Ю. Тержевик

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение. Цель лекции – знакомство с особенностями сезонной динамики термического и кислородного режимов небольших озер умеренной зоны, а также с методиками гидрофизических измерений.

Данная лекция может быть использована на географических факультетах вузов в курсах лекций по гидрологии суши, а также в качестве общеобразовательной в курсе географии средней школы.

Термический режим мелководных озер умеренной зоны. Многочисленные мелководные озера умеренной зоны Евразии и Северной Америки характеризуются прямой температурной стратификацией с температурой выше 4 °С летом и обратной температурной стратификацией и температурой от 0 до 4–5 °С зимой. Термический режим бореальных озер в течение года определяется поглощением солнечной радиации, обменом теплом на границах водной толщи с атмосферой и грунтом, а также перераспределением тепла течениями и турбулентным перемешиванием (Зайков, 1955; Форш, 1968; Пивоваров, 1972; Кузьменко, 1976; Бояринов, Петров, 1991; Malm et al., 1996–1998 и др.). Специфика пресноводных водоемов обусловлена тем, что плотность воды имеет максимум при температуре ~4 °С. С этим свойством воды связаны такие важнейшие явления и процессы, как термобар (Ти-

хомиров, 1982; Зилитинкевич, Тержевик, 1987), весенняя подледная конвекция (Петров, Сутырин, 1985; Миронов, Тержевик, 2000; Farmer, 1975), весенняя и осенняя гомотермия (Hutchinson, 1957), плотностные течения и циркуляции (Birge et al., 1928; Likens, Ragotskie, 1965; Rahm, 1985; Bengtsson, Svensson, 1996 и др.).

Тепловой баланс мелководного озера Q_T может быть представлен в виде (Бояринов, Петров, 1991):

$$Q_T = Q_R + Q_A + Q_L + Q_S + Q_M + Q_K + Q_N + Q_B,$$

где Q_R – поглощенные озером прямая и рассеянная солнечная радиация, Q_A – эффективное длинноволновое излучение, Q_L – испарение и конденсация, Q_S – контактный теплообмен с атмосферой, Q_M – изменение теплосодержания при льдообразовании и льдотаянии, Q_K – обмен теплом с донными отложениями, Q_N – изменение теплосодержания за счет поступления подземных вод, Q_B – изменение теплосодержания за счет речного стока.

Летом тепловой баланс озера определяется взаимодействием его водной массы с атмосферой (первые четыре слагаемых в правой части уравнения). Зимой, когда снежно-ледяной покров препятствует непосредственному контакту с атмосферой, определяющим в уравнении теплового баланса мелководного малопроточного озера становится поток тепла на границе вода – дно Q_K . При льдообразовании и льдотаянии возрастает вклад слагаемого Q_M . Для малых озер с высокой проточностью существенна роль Q_B . Эффективное излучение Q_A (разница собственного излучения поверхности и приходящего на нее излучения атмосферы) с поверхности озера, покрытого льдом, существенно уменьшается, особенно после выпадения снега; контактный теплообмен на границе с атмосферой Q_S и потери тепла на испарение Q_L становятся пренебрежимо малыми. На нижней границе льда поддерживается температура замерзания воды (0 °C). Тепловое воздействие атмосферы проявляется в изменении толщины снежно-ледяного покрова, в процессе эволюции которого значительно меняется количество и спектральный состав проникающей под лед солнечной радиации $Q_R = (1 - A)I_0$, где A – альbedo воды, снега или льда; I_0 – поток солнечной радиации, приходящий на поверхность воды, снега или льда.

Альbedo поверхности представляет собой отношение отраженного потока солнечной радиации к полному падающему потоку. Величина альbedo определяется высотой стояния Солнца, метеоусловиями, состоянием отражающей поверхности и изменяется в пределах от 0,04–0,06 (вода) до 0,95 (свежевыпавший снег). Альbedo старого снега колеблется в широких пределах в зависимости от его состояния и структуры от 0,85 (сухой снег) до 0,2 (влажный загрязненный). Альbedo льда существенно зависит от наличия в нем пузырьков воздуха, водорослей, других частиц и изменяется от 0,35–0,4 (чистый лед) до 0,1–0,15 (загрязненный) (Чехин, 1987; Петров и др., 2005; Bolsenga, 1977).

Проникающая в воду, снег или лед солнечная радиация поглощается, рассеивается в их поверхностных слоях и, преобразуясь в тепло, нагревает их. Ослабление проникающей солнечной радиации в среде принято выражать законом Бугера-Ламберта:

$$Q_R(z) = Q_R(0) e^{-kz},$$

где $Q_R(z)$ и $Q_R(0)$ – поток солнечной радиации на поверхности и на глубине z , соответственно, Вт × м²; k – коэффициент ослабления радиации в слое от поверхности до глубины z , м⁻¹, зависящий от высоты стояния Солнца, спектрального состава радиации и прозрачности среды, в частности, воды, снега или льда.

Традиционно выделяют этапы годового цикла бореальных озер: весеннее и осеннее перемешивание, летняя и зимняя стратификация (Зайков, 1955). Молекулярная теплопроводность воды существенно меньше конвекционной, поэтому в процессе переноса тепла внутри водоема последняя играет решающую роль. Конвекционная теплопроводность может быть обусловлена турбулентным и ветровым перемешиванием, а также неравномерным распределением температур внутри водной толщи водоема. Свободная конвекция играет наибольшую роль в перемешивании водоема в периоды его весеннего нагревания и осеннего охлаждения. Весеннее конвективное перемешивание в озерах умеренных широт начинается еще подо льдом вследствие увеличения проникновения солнечной радиации в воду при стаивании снега (Петров, Сутырин, 1985; Farmer, 1975). При нагревании от 0 до +4 °C плотность воды возрастает, и более теплая и тяжелая вода начинает опускаться, выталкивая менее плотную холодную воду из нижележащих слоев. При этом постепенно в конвективные движения вовлекаются все более глубинные слои. Разрушение ледяного покрова на мелководных озерах про-

исходит при средней температуре столба воды $+3...+4$ °С. После очищения озера ото льда его водная толща некоторое время (до нескольких недель) находится в состоянии гомотермии или слабой термической стратификации. На этапе летнего нагревания вследствие радиационного прогрева происходит повышение температуры водной толщи водоемов. Осеннее охлаждение озера начинается, когда потери тепла начинают преобладать над приходом. Осенью при охлаждении поверхностных слоев начинается их перемещение вниз до слоя соответствующей плотности с одновременным вытеснением более теплых и легких вод на поверхность. Глубина и скорость проникновения конвекции определяются отрицательной устойчивостью слоев: чем она больше, тем быстрее и на большие глубины распространяется конвекция. Продолжительность конвекции определяется временем, необходимым для нагревания всей толщи водоема от 0 до $+4$ °С весной и для охлаждения до $+4$ °С осенью. Дальнейшее охлаждение водной массы озера осенью осуществляется под действием ветра.

Зимой, когда сплошной снежно-ледяной покров препятствует непосредственному контакту между водой и атмосферой, тепловой баланс озера определяют потоки на границах вода – дно и вода – лед. По данным натурных наблюдений минимальное теплосодержание мелководного озера относится к моменту ледостава (Кузьменко, 1976). После установления льда начинается нагревание водной толщи озера, обусловленное теплообменом с донными отложениями. Особенности термического режима озера в начале зимы определяются количеством тепла, накопленным донными отложениями за лето, и степенью остывания водной массы в предледоставный период. Летом донные отложения слабо стратифицированных озер хорошо прогреваются и зимой интенсивно отдают тепло в водную толщу. Потоки тепла из донных отложений в воду в начале зимы достигают $6,5 \text{ Вт} \times \text{м}^2$ и снижаются до $0,5-3,0 \text{ Вт} \times \text{м}^2$ к концу зимы (Bengtsson, Svensson, 1996). Потоки тепла на границе вода – лед в начале и середине зимы имеют порядок $0,5-2,8 \text{ Вт} \times \text{м}^2$ (Malm et al., 1996, 1997).

Кислородный режим озер умеренной зоны. Изменение содержания растворенного кислорода в мелководном озере в течение года можно разделить на отдельные этапы, связанные с формированием в нем плотностной стратификации, обусловленной, главным образом, температурой воды. Таким образом, для кислородного и термического режимов выделяются сходные этапы годового цикла. После очищения ото льда на этапе весеннего перемешивания происходит насыщение водной массы озера кислородом. Летом содержание кислорода в озерных водах постепенно уменьшается, поскольку по мере роста температуры воды понижается его растворимость (Ульянова, 1984; Харкевич, 1991). При развитой термической стратификации в озерах формируется вертикальная неоднородность в распределении кислорода (от $6-8 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ в поверхностных слоях до острого дефицита или даже полного отсутствия у дна). В период осеннего перемешивания водные массы озер становятся квазиоднородными по температуре, растворенным минеральным веществам и газам. С понижением температуры растворимость кислорода увеличивается, поэтому осенью наблюдается постепенное насыщение воды кислородом. Содержание кислорода достигает максимальных значений ($12-13 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ при 100%-м насыщении) перед установлением льда при значениях температуры воды в диапазоне $0-2$ °С. Зимой содержание кислорода в озерах обычно снижается вследствие деструкции органического вещества в водной толще и бактериальной активности на границе с донными отложениями (Бреховских, 1988; Hargrave, 1972). В придонных слоях часто возникает дефицит кислорода.

Наиболее благоприятным для жизнедеятельности населяющих водоем организмов считается насыщение воды растворенным кислородом в пределах 80–105 %. Как правило, такие условия характерны для олиготрофных олиго- и мезогумозных водоемов. К водоемам с хорошим кислородным режимом относятся те, в которых насыщение составляет 60–120 %. Перенасыщение вод кислородом связано с повышенной трофностью водоема (эвтрофные озера). Низкое насыщение вод кислородом, как правило, наблюдается в придонных слоях в вегетационный период и во время зимней стагнации.

Дефицит кислорода возникает в озерах при отсутствии аэрации водной толщи. Возникновение анаэробных зон в озерах может происходить как в условиях открытой воды, так и зимой. Летом дефицит растворенного кислорода в придонных слоях мелководных озер существует относительно недолго в силу квазипериодического ветрового перемешивания (Ульянова, 1984; Харкевич, 1991). Поэтому основную опасность для озерных экосистем это явление представляет в период ледостава, когда в озере практически отсутствуют источники поступления кислорода (газообмен между атмосферой и

озером отсутствует, а проникновение солнечной радиации под лед крайне незначительно, что приводит к подавлению процессов фотосинтеза).

Такие факторы, как жизнедеятельность различных организмов и концентрация органического вещества в придонной области, оказывают определяющее влияние на появление дефицита кислорода в озере зимой (Винберг, 1960; Бульон, 1983; Hutchinson, 1957; Mortimer, 1971; Hargrave, 1972; Mathias, Barica, 1980). Бактериальная активность существенно зависит от скорости течений в придонном пограничном слое (Mackenthun, Stefan, 1998) и температуры (Бреховских, 1988; Boylen, Brock, 1973). Обострение или ослабление плотностной стратификации может изменять скорость вертикальной диффузии растворенного кислорода (Тержевик и др., 2010; Golosov, Ignatieva, 1999).

Гидродинамические процессы, такие как плотностная циркуляция, волновое перемешивание, внутренние волны, сейши, турбулентное перемешивание в придонном пограничном слое, оказывают существенное влияние на термический и кислородный режимы водоемов в течение года (Петров и др., 2006, 2007; Farmer, Carmack, 1981; Baehr, DeGrandpre, 2002; Wüest, Lorke, 2003; Golosov et al., 2007; Terzhevik et al., 2009).

Исследования зимнего режима озер. Традиционно большинство лимнологических исследований охватывало период открытой воды. Зимний режим мелководных бореальных озер долгое время оставался недостаточно изученным, несмотря на то что период ледостава на них продолжается несколько месяцев. Зима рассматривалась как «мертвый» сезон. До 90-х гг. XX в. в мире насчитывалось лишь несколько десятков работ, посвященных термодинамике покрытых льдом водоемов. Интерес к зимнему периоду возрос с появлением высокочувствительного оборудования, способного регистрировать малые пульсации гидрофизических и химико-биологических параметров. Однако до настоящего времени все еще остаются недостаточно изученными многие стороны зимнего режима озер, в частности, вопросы переноса тепла, газов и веществ внутри водной толщи, механизмы генерации движений, процесс весенней подледной конвекции, подледная освещенность, а также вопросы влияния гидрофизических факторов на формирование дефицита кислорода.

Гидрофизические исследования оз. Вендюрского. Начиная с 1994 г. и до настоящего времени ежегодные комплексные гидрофизические исследования проводятся на небольшом оз. Вендюрском, расположенном на юге Карелии ($62^{\circ}10' - 62^{\circ}20' \text{ N}$, $33^{\circ}10' - 33^{\circ}20' \text{ E}$) (рис. 1). Площадь зеркала озера $10,4 \text{ км}^2$, объем вод $\sim 5,5 \times 10^7 \text{ м}^3$, средняя глубина 5,3, максимальная 13,4 м, площадь водосборного бассейна $82,8 \text{ км}^2$. Озеро принадлежит к бассейну водной системы р. Суны. Котловина озера ледникового происхождения. Объем речного стока невелик. Коэффициент водообмена озера $0,4 \text{ год}^{-1}$, прозрачность вод по диску Секки 3–4 м. Донные отложения представляют собой песок на мелководье и илы в глубоководной части озера (Литинская, Поляков, 1975). Оз. Вендюрское является типичным представителем озер водно-ледникового генезиса (Тержевик и др., 2010), широко распространенных на территории Фенноскандии. Полученные в результате исследований заключения и выводы можно рассматривать как характерные для подобных озер, имеющих мезотрофный или эвтрофный статус.

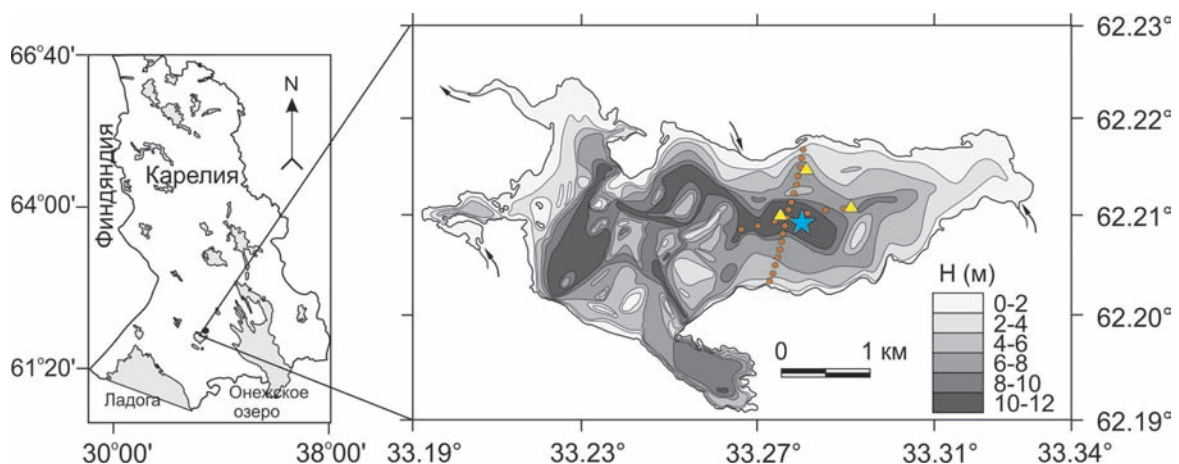


Рис. 1. Оз. Вендюрское и положение станций измерений:

треугольники – термокосы, звезда – придонная платформа, кружки – станции вертикальных зондирований

Комплексные исследования озера были начаты весной 1994 г. в рамках совместных проектов с Департаментом инженерии водных ресурсов Лундского университета (Швеция) и проводились при поддержке Европейской Комиссии (проекты INTAS-97-0734, INTAS-01-2132 и INTAS-05-1000007-431), Шведской Королевской Академии Наук и фонда Åke och Greta Lisshed Foundation (Швеция), НАТО (программа SECURITY THROUGH SCIENCE, проект ESP.NR.NRCLG 982964) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-05-00351; 10-05-91331-ННИО-а совместно с институтом пресноводной экологии IGB, Германия и Университетом Хельсинки; 13-05-00338, 14-05-91761, 14-05-00787).

Главная цель исследований – расширение современных представлений о протекающих в озерах подо льдом термодинамических, химико-биологических и радиационных процессах и их количественное описание.

Положение станций измерений приведено на рис. 1. Измерения проводились в режиме вертикального зондирования, а также включали постановку автономных станций. Измеряемыми параметрами в разные полевые сезоны были: температура и электропроводность воды, температура донных отложений до глубины 1,35 м, содержание растворенного кислорода, содержание хлорофилла «а», скорость и направление течений, вертикальные смещения льда, потоки падающей, отраженной и подледной солнечной радиации, поток фотосинтетически активной солнечной радиации на нижней границе льда и в водной толще озера до глубин 7,2 м.

Ледовый режим оз. Вендюрского. Замерзает оз. Вендюрское в первой половине ноября – начале декабря, разрушение льда происходит в первой половине мая, продолжительность ледостава 5,0–6,5 месяца (Петров и др., 2006; Zdrovennov et al., 2013). Максимальной толщины (0,4–0,8 м) снежно-ледяной покров достигает к концу марта (Петров и др., 2005; Zdrovennova et al., 2013) и имеет обычно многослойную структуру, включающую слои снега, белого и кристаллического льда, между которыми зачастую наблюдается прослойка влажного снега. Многослойная структура льда типична для малых бореальных озер (Ashton, 2011).

Термический и кислородный режимы оз. Вендюрского. На этапе осеннего охлаждения оз. Вендюрское находится в состоянии гомотермии, его водная масса достаточно хорошо насыщена кислородом. В начале этапа осеннего охлаждения концентрация растворенного кислорода от поверхности до дна обычно составляет $\sim 8\text{--}9 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ (насыщение – 80–90 %). По мере понижения температуры концентрация кислорода постепенно увеличивается в соответствии с повышением его растворимости (в среднем на $0,05\text{--}0,1 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ за сутки при уменьшении температуры воды на $0,2\text{--}0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$). В результате интенсивного конвективно-ветрового перемешивания и активного газообмена с атмосферой постепенно увеличивается процентное насыщение воды кислородом. В середине октября концентрация кислорода от поверхности до дна обычно составляет $\sim 10\text{--}11 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ (насыщение – 88–98 %), снижаясь до нуля непосредственно на границе вода – дно. Максимальное содержание кислорода в водах озера ($12\text{--}13 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ при насыщении 90–95 %) наблюдается непосредственно перед установлением льда при минимальном теплосодержании (средняя температура $0,5\text{--}1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Зимнее нагревание водной толщи озера, обусловленное теплообменом с донными отложениями, начинается сразу после появления сплошного льда. Наиболее быстрый рост температуры наблюдается в придонном слое глубоководной котловины (рис. 2, А, Б). На мелководьях (рис. 2, В) скорость повышения температуры заметно ниже. Скорость повышения температуры падает уже в конце первого месяца ледостава. К концу зимы температура придонных слоев в центральной котловине озера повышается до $4,5\text{--}5,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

С первых же дней после замерзания озера наблюдается уменьшение содержания растворенного кислорода, наиболее выраженное в придонных слоях глубоководной котловины. К концу первого месяца ледостава концентрация кислорода в придонном слое толщиной $0,1\text{--}0,2 \text{ м}$ в глубоководной части озера понижается до $0,5\text{--}1,0 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$. К середине зимы здесь формируется анаэробная зона толщиной до метра. В $2\text{--}3 \text{ м}$ над дном концентрация кислорода при этом достигает $2\text{--}5 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$.

Весенняя подледная конвекция начинается обычно в конце марта – начале апреля и продолжается около месяца. Температурный профиль зимой характеризуется непрерывным увеличением значений от нижней поверхности льда до дна. С началом конвекции формируются подледный градиент-

ный и конвективный перемешанный (КПС) слой, а также слой вовлечения (Петров, Сутырин, 1985; Farmer, 1975). Толщина подледного слоя может составлять несколько десятков см, градиент температуры в нем достигает $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{м}^{-1}$. Толщина и температура КПС при развитой конвекции увеличиваются в сутки на $0,1\text{--}0,8\text{ м}$ и $0,05\text{--}0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. Обычно к моменту взлома льда конвективное перемешивание проникает до глубин $8\text{--}9\text{ м}$. Температура КПС при этом составляет $3,7\text{--}4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере заглубления нижней границы КПС происходит выравнивание концентраций кислорода по вертикали. Придонная анаэробная зона центральной котловины озера существует до конца ледостава.

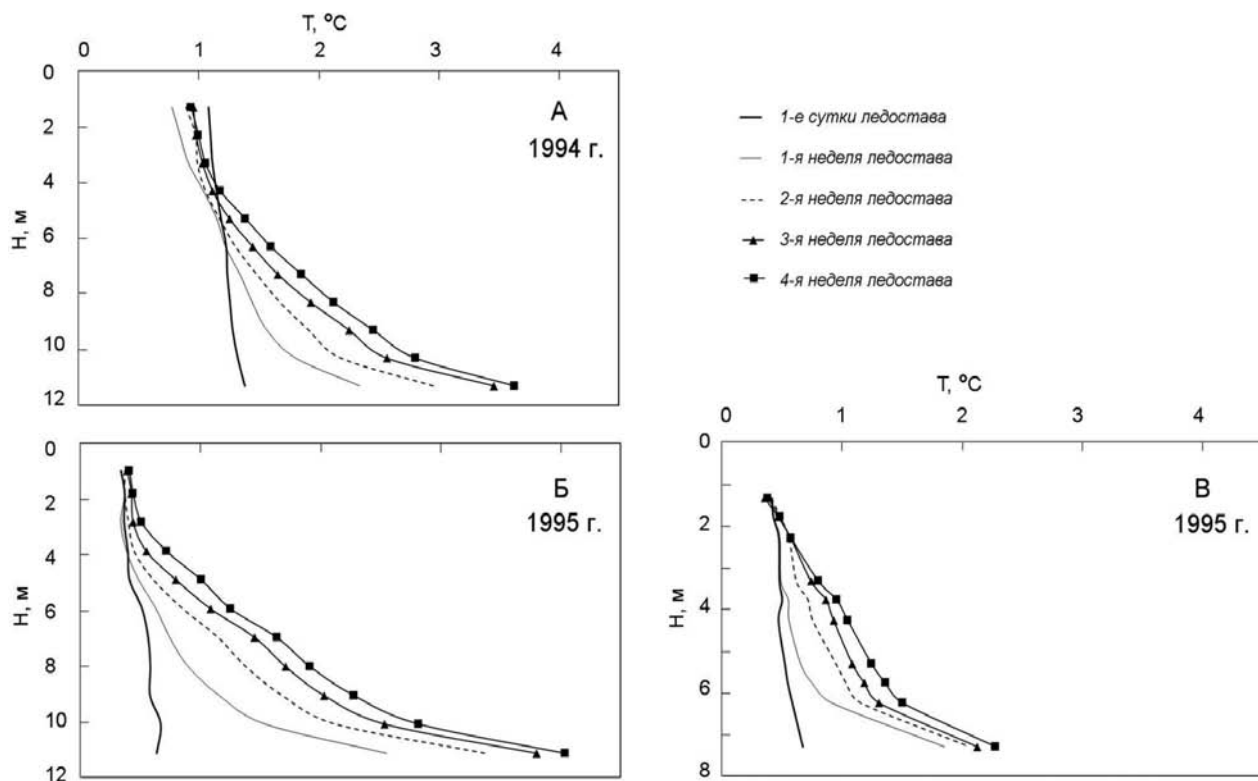


Рис. 2. Изменение вертикального температурного профиля в центральной глубоководной части оз. Вендюрского (А, Б) и на склоне (В) в течение первых четырех недель ледостава в 1994 и 1995 гг.

После очищения ото льда происходит полное перемешивание озерной водной массы, включая придонные слои центральной котловины, и разрушение придонной анаэробной зоны. Концентрация кислорода увеличивается до $10,0\text{--}11,5\text{ мг} \times \text{л}^{-1}$, насыщение достигает $80\text{--}90\%$. После взлома льда водная масса озера некоторое время (2–3 недели) находится в состоянии, близком к гомотермии. Температура поверхностных слоев растет под влиянием радиационного прогрева, однако в мае нередко заморозки, усиления ветра, периодические похолодания продолжительностью в несколько дней, способствующие развитию конвективно-ветрового перемешивания и передаче тепла и кислорода к нижележащим слоям. К концу мая температура водной толщи повышается обычно до $8\text{--}11\text{ }^{\circ}\text{C}$. В июне погода неустойчива, с периодическими похолоданиями и усилениями ветра. Водная масса озера находится в состоянии слабовыраженной стратификации, периодически сменяющейся гомотермией. На фоне жаркой маловетренной погоды формируется подповерхностный термоклин. В мае-июне при быстром росте температуры воды насыщение кислорода в светлое время суток в верхнем слое нередко превышает 100% ($103\text{--}106\%$ – 23–30 мая 2009 г., $105\text{--}113\%$ – 15–22 мая 2010 г.). В то же время в моменты установления кратковременной термической стратификации при маловетренной погоде отмечается общая тенденция снижения концентрации кислорода по всей водной толще. Это, вероятно, происходит вследствие преобладания биохимического потребления кислорода над его выделением в результате фотосинтеза в условиях ослабления аэрации водоема. В мае-июне отмечается понижение концентрации кислорода до $5\text{--}7\text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ в метровом придонном слое в глубоководной части озера.

В июле – первой половине августа достигается годовой максимум температуры поверхности (20–25 °С). Если преобладающая погода в июле прохладная и ветреная, водная масса озера периодически перемешивается до дна, как, например, в 2009 (рис. 3, А) и 2012 гг. При этом происходит интенсивная передача тепла верхнему слою донных отложений и насыщение кислородом придонных слоев (рис. 3, В). К началу августа в такие годы температура придонных слоев повышается до 17–18 °С. Если преобладающая погода июля жаркая и маловетренная, формируется резкий термоклин. Например, в середине июля 2010 г. градиент температуры в слое 3–5 м достигал $5\text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{м}^{-1}$ (рис. 3, Б). Термоклин препятствует передаче тепла от поверхности, поэтому придонная температура меняется слабо. К началу августа 2008, 2010 и 2011 гг. придонная температура повысилась лишь до 14–15 °С. На фоне повышения температуры воды поверхностного слоя до 15–20 °С концентрация кислорода в нем снижается до 8–9 $\text{мг} \times \text{л}^{-1}$ (при насыщении 80–100 %), при температуре воды выше 20 °С (2007, 2010, 2011 гг.) концентрация кислорода уменьшается до 6–7 $\text{мг} \times \text{л}^{-1}$ (70–80 %). К концу периода летнего нагревания толщина анаэробной зоны в центральной глубоководной части озера достигает 0,5–1,0 м (рис. 3, В), а в отдельные годы на фоне жаркой безветренной погоды может быть более 2–3 м. Наиболее драматическая ситуация наблюдалась в озере летом 2010 г. (рис. 3, Г): в период с 1 по 20 августа в 5,5-метровом придонном слое концентрация кислорода не превышала 2,5 $\text{мг} \times \text{л}^{-1}$, резко снижаясь до нуля у границы с дном.

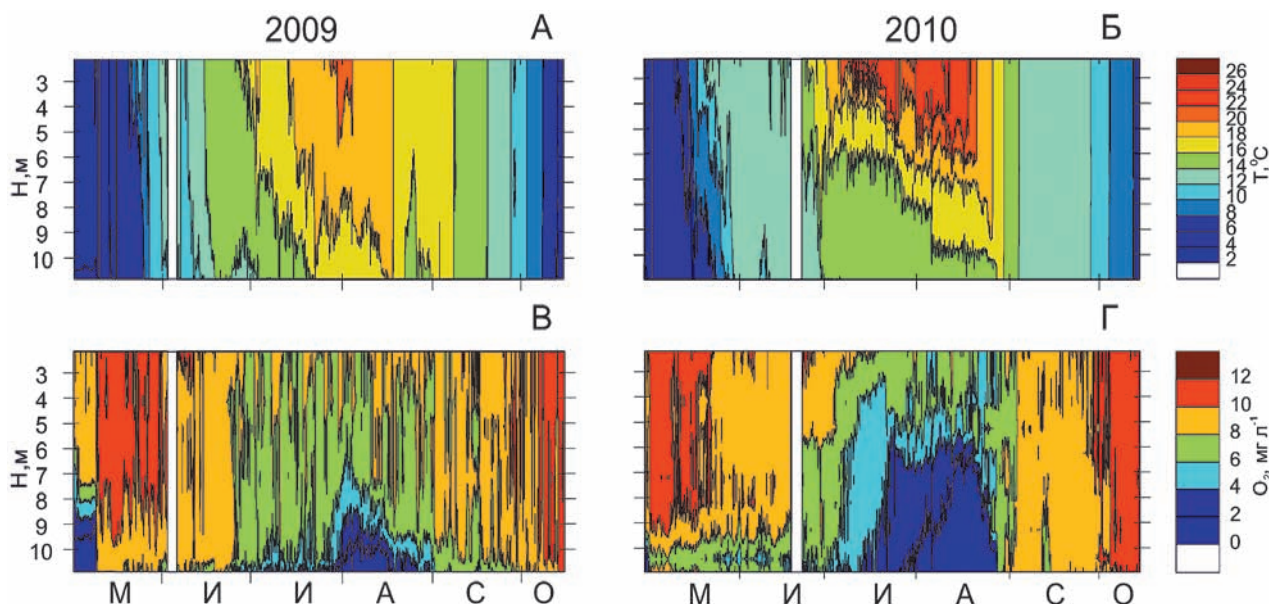


Рис. 3. Температура водной толщи (А, Б) и концентрация растворенного кислорода (В, Г) в глубоководной части оз. Вендюрского летом 2009 и 2010 гг.

Максимум теплосодержания оз. Вендюрского наблюдается обычно в последних числах июля – начале августа. Вслед за уменьшением температуры воздуха температура перемешанного слоя постепенно понижается, толщина его увеличивается, в определенный момент он достигает дна, термоклин разрушается, и в дальнейшем озеро охлаждается в состоянии, близком к гомотермии, под действием свободной (плотностной) и вынужденной (ветровой) конвекции. В 2008 и 2011 гг. термоклин достиг дна и полностью разрушился в первых числах августа, летом 2010 г. – лишь после 23 августа. По мере заглубления сезонного термоклина выравнивается содержание кислорода в верхнем перемешанном слое, однако только после полного перемешивания водной массы озера (август) происходит окончательное разрушение придонной анаэробной зоны.

Средняя скорость понижения температуры водной толщи оз. Вендюрского на этапе осеннего охлаждения составляет $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{сут}^{-1}$, а максимальная может превышать $0,4\text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{сут}^{-1}$. Погодные условия определяют интенсивность выхолаживания водной массы и донных отложений озера. В октябре нередки заморозки, поэтому первый прибрежный лед может появляться уже в конце октября. Длительность предледоставного периода определяется погодными условиями каждого конкретного года. При затяжной теплой осени с сильными ветрами устойчивый ледяной покров образуется

лишь в начале декабря (1996, 2005, 2008 гг.), при этом происходит значительное истощение теплозапаса донных отложений. На фоне морозной погоды озеро замерзает в начале – середине ноября (1994, 1995, 1998, 1999, 2007 гг.), сохранив значительное количество тепла, накопленного донными отложениями на этапе летнего нагревания.

Полученная в ходе многолетних измерений информация позволяет судить о межгодовой, сезонной, синоптической и мелкомасштабной изменчивости температуры и содержания кислорода в водах озера, включая периоды образования и разрушения льда. Использование высокочувствительного оборудования в продолжительных измерениях температуры воды и содержания кислорода с малым шагом по времени (от 10 секунд) позволило получить принципиально новую информацию о временном ходе переноса тепла и вещества вблизи границы водной массы с донными отложениями в течение года.

Проведен анализ синоптических условий района исследований и ледового режима оз. Вендюрского, рассмотрен годовой термический цикл и пространственно-временная динамика содержания растворенного кислорода.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные компоненты теплового баланса мелководного озера и охарактеризуйте роль каждого из них в течение года.
2. Какие гидрофизические явления, наблюдающиеся в озерах, связаны с процессом свободной конвекции?
3. Какие основные факторы определяют уменьшение содержания растворенного кислорода в озере в течение года?
4. Какую роль играет весенняя подледная конвекция в функционировании озерной экосистемы?

Литература

- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 166 с.
- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск: АН СССР, 1960. 329 с.
- Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 272 с.
- Зилитинкевич С. С., Тержевик А. Ю. Термический бар // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 732–738.
- Ковалева Н. В., Мединец В. И., Газетов Е. И. Влияние температуры и содержания кислорода на интенсивность аэробного окисления органического вещества в водах Черного моря // Гидробиол. журн. 2003. Т. 39, № 4. С. 34–41.
- Кузьменко Л. Г. Термический режим водной массы и донных отложений озера // Биологическая продуктивность озера Красного. Л.: Наука, 1976. С. 18–36.
- Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1975. С. 57–66.
- Миронов Д. В., Тержевик А. Ю. Весенняя конвекция в пресноводных озерах, покрытых льдом // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 5. С. 681–688.
- Петров М. П., Сутырин Г. Г. Суточный ход конвекции в озере подо льдом // Метеорология и гидрология. 1985. № 1. С. 91–99.
- Петров М. П., Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И. и др. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.
- Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.
- Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.
- Пивоваров А. А. Термика замерзающих водоемов. М.: МГУ, 1972. 140 с.
- Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.
- Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.

- Ульянова Д. С. Кислородный режим озер // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 91–95.
- Форш Л. Ф. Термический режим, тепловой баланс озер и роль иловой толщи в их тепловом бюджете // Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР. Ч. 1. Л.: Наука, 1968. С. 166–208.
- Харкевич Н. С. Кончезерская группа озер // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. С. 80–85.
- Чехин Л. П. Световой режим водоемов. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 130 с.
- Ashton G. D. River and lake ice thickening, thinning and snow ice formation // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011. Vol. 68. P. 3–19.
- Baehr M. M., DeGrandpre M. D. Under-ice CO₂ and O₂ variability in a freshwater lake // *Biogeochemistry*. 2002. Vol. 61. P. 95–113.
- Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // *Nordic Hydrol.* 1996. Vol. 27. P. 39–56.
- Birge E., Juday Ch., March H. The temperature of the bottom deposits of lake Mendota: a chapter in the heat exchanges of the lake // *Trans. Wisc. Acad. Sci.* 1928. Vol. 23. P. 187–231.
- Bolsenga S. J. Preliminary observations on the daily variation of the albedo // *J. Glaciol.* 1977. Vol. 18. P. 517–521.
- Boyle C., Brock T. Bacterial decomposition processes in Lake Wingra sediments during winter // *Limnol. Oceanogr.* 1973. Vol. 18, N 4. P. 628–634.
- Farmer D. H. Penetrative convection in the absence of mean shear // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1975. V. 101. P. 869–891.
- Farmer D. M., Carmack E. Wind mixing and restratification in a lake near the temperature of maximum density // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. Vol. 11. P. 1516–1533.
- Golosov S. D., Ignatieva N. V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 408/409. P. 153–157.
- Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.
- Hargrave B. A comparison of sediment oxygen uptake, hypolimnetic oxygen deficit and primary production in Lake Esrom, Denmark // *Vehr. Int. Ver. Limnol.* 1972. N 18. P. 134–139.
- Hutchinson G. A treatise on limnology. N.Y.: V I. J. Wiley and Son, Inc., 1957. 1015 p.
- Likens G. E., Ragotzkie R. A. Vertical water motions in a small, ice-covered lakes // *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 2333–2344.
- Mackenthun A. A., Stefan H. G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Experiments // *J. Environ. Eng.* 1998. Vol. 124. P. 222–230.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995. *Dep. of Water Res. Eng. Ins. of Technol. University of Lund*, 1996. N 3197. 220 p.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. *Department of Water Resources Engineering, Institute of Technol. University of Lund*, 1997. N 3213. 203 p.
- Malm J., Bengtsson L., Terzhevik A. et al. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43, N 7. P. 1669–1679.
- Mathias J., Barica J. Factors controlling oxygen depletion in ice-covered lakes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37. P. 185–194.
- Mortimer C. H. Chemical exchanges between sediments and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms // *Limnol. Oceanogr.* 1971. Vol. 16, N 2. P. 387–404.
- Rahm L. The thermally forced circulation in a small, ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1985. 30. P. 1122–1128.
- Terzhevik A., Golosov S., Palshin N. et al. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendurskoe, Russia // *Aquatic Ecology*. 2009. Vol. 43. P. 617–627. DOI: 10.1007/s10452-009-9288-x.
- Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes // *Rev. Fluid Mech.* 2003. 35. P. 373–412. DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220.
- Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 61, N 1. P. 26–32.
- Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012) // *Annals of Glaciology*. 2013. Vol. 54, N 62. P. 121–124.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

В настоящее время в связи с загрязнением водной среды все большую актуальность приобретает вопрос оценки ее качества и возможности применения воды для конкретных видов водопользования, а также выявления антропогенного влияния на состояние водных объектов. Однако в связи с тем что эта оценка проводится по нескольким десяткам химических параметров, данный анализ представляет собой достаточно трудоемкий и длительный процесс. Особенно сложно это сделать для водных объектов обширного региона с развитой озерно-речной системой, примером которого может являться Республика Карелия.

На современном уровне развития гидрохимической науки оценка состояния водных объектов проводится по нескольким десяткам химических параметров, а при учете сезонной и годовой изменчивости гидрохимического режима водоемов и водотоков объем исходной информации может возрасти в десятки и сотни раз. Обработка таких массивов без использования компьютерной техники значительно затруднена, а в некоторых случаях невозможна. Следует отметить, что компьютерная обработка информации позволяет в полной мере использовать геоинформационные технологии для ускорения самого процесса обработки, реализует новые средства ее визуального представления, позволяет в полной мере оценить и проанализировать изучаемые природные процессы. В связи с этим необходима разработка нового программного обеспечения в области гидрохимии вод суши, позволяющего не только проводить оценку состояния водных объектов, но и представлять ее результаты в удобном для восприятия виде с использованием геоинформационных систем (ГИС).

Изложение материала

При создании автоматизированной системы перед исследователем встают те же задачи, что и в процессе научного познания. Это сбор информации, ее анализ, моделирование и прогноз. В случае с АИС под сбором информации, как правило, понимается формирование базы данных, под анализом — их интерпретация, а моделирование подразумевает поиск взаимосвязей между различными показателями, в то время как прогноз — применение выявленных закономерностей на новых массивах данных и их интерполяция на будущие периоды времени или неизученные объекты.

В области наук о Земле процессу формирования баз данных обычно предшествуют полевые исследования и лабораторная обработка полученных в их ходе проб. Также базы данных могут формироваться в процессе сбора архивных либо литературных данных.

Базы данных (БД) различной структуры и назначения вошли уже не только во все области науки и техники, но и в повседневную жизнь каждого человека. Их роль в экологическом мониторинге и оценке состояния природной среды является ключевой, БД и системы управления (СУБД) организуют ввод, хранение и предоставление информации конечному пользователю. СУБД представляет собой специализированную программу (или их комплекс), предназначенную для организации и ведения базы данных. Ее основными функциями является управление данными во внешней и оперативной памяти, протоколирование изменений, резервное копирование и восстановление базы данных после сбоев, поддержка языков манипулирования данными, таких как SQL (structured query language, язык структурированных запросов).

Реляционная модель данных (англ. relation — отношение) на сегодняшний день фактически является стандартом для разработки коммерческих СУБД. Эта модель была предложена сотрудником компании IBM Е. Ф. Коддом в 1970 г. (Codd, 1999). Она характеризуется простой структурой, удоб-

ным для пользователя табличным представлением и возможностью использования формального аппарата алгебры отношений для обработки данных.

Различные экологические базы данных доступны через интернет, например, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова предоставляет возможность доступа к базам данных, содержащим информацию о гидрологическом, гидрохимическом режиме, гидробиологические и другие данные по многим водным объектам России в рамках программы создания информационной системы «Фундаментальные проблемы оценки состояния экосистем и экологического нормирования» (ecograde.bio.msu.ru).

Институт водных проблем Севера ведет наблюдение за водными объектами Республики Карелия с 1946 г. За это время накоплен огромный массив информации, хранящийся как на бумажных, так и на электронных носителях. Гидрохимическая база исходных данных включает в себя общую информацию (название объекта, номер станции, географические координаты, номер пробы, горизонт, дата отбора пробы), химические и физико-химические показатели. Эта база данных и была использована при создании описываемой здесь АИС.

На этапе интерпретации основной задачей является уменьшение размерности массива данных без значимой потери содержащейся в нем информации. Эта задача решается применением различных систем классификации, построением интегральных показателей, а также с применением методов нечеткого шкалирования, лингвистических переменных, функций желательности и др., нашедших широкое распространение в экспертных системах (ЭС) и системах поддержки принятия решений (СППР).

Большинство задач, встречающихся в процессе оценки качества вод, на сегодняшний день не имеют строгого алгоритмического выражения, а используют элементы экспертной оценки. Подобные задачи носят название слабоструктурированных и решаются в области экспертных систем (ЭС) и систем поддержки принятия решений (СППР).

Разделяют понятия классификаций в географическом и признаковом пространствах. В первом случае рассматривается трехмерное евклидово пространство, выраженное в географических координатах или других метрических единицах, во втором – многомерное пространство признаков изучаемого объекта. При этом изучаемый объект отображается в этом многомерном пространстве в виде N-мерной точки.

Нахождение объекта в каждом признаковом пространстве может описываться двумя способами (Капралов и др., 2004): в виде матрицы объект – признак, где номера столбцов соответствуют различным объектам, а строки – признакам. Поскольку размерность признаков может быть различна, для расчета расстояний между объектами в признаковом пространстве необходимо проведение процедур нормировки.

Положение объектов в признаковом пространстве также может быть задано матрицей их взаимного расположения. При этом столбцы соответствуют признакам одного объекта, а строки – другого. В ячейках матрицы записываются характеристики их взаимного различия или сходства, матрица является симметричной, содержащей нули на главной диагонали.

Расстояние между объектами в пространстве показателей характеризует их сходство между собой, а если в качестве второго объекта выбрано средневзвешенное значение в пределах одного класса, то расстояние от объекта до этой точки характеризует его принадлежность к данному классу. Такой подход был применен в данной работе при автоматизированной реализации геохимической классификации водных объектов (Зобков, 2008).

В зависимости от типа шкал расстояние в признаковом пространстве может быть вычислено различными способами (Айвазян и др., 1989):

Обычное евклидово расстояние:
$$L_e(o_j, o_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (o_j^{(k)} - o_i^{(k)})^2} ;$$

Взвешенное евклидово расстояние:
$$L_w(o_j, o_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^N w^{(k)} (o_j^{(k)} - o_i^{(k)})^2} , \text{ где } w^{(k)} - \text{вектор весов;}$$

Манхэттенское расстояние
$$L_M(o_j, o_i) = \sum_{k=1}^N |o_j^{(k)} - o_i^{(k)}| .$$

Также в качестве меры близости между изучаемыми объектами в признаковом пространстве могут быть использованы коэффициенты корреляции.

Таким образом, становится ясно, что задача оценки состояния водных объектов является нечетко структурированной и базируется главным образом на экспертных заключениях. При этом основные компоненты системы оценки могут быть получены из теоретических представлений о формировании химического состава воды, лежащих в основе закономерностей распределения химических показателей, либо с применением различных статистических методов, позволяющих выявить эти закономерности и, соответственно, главные компоненты.

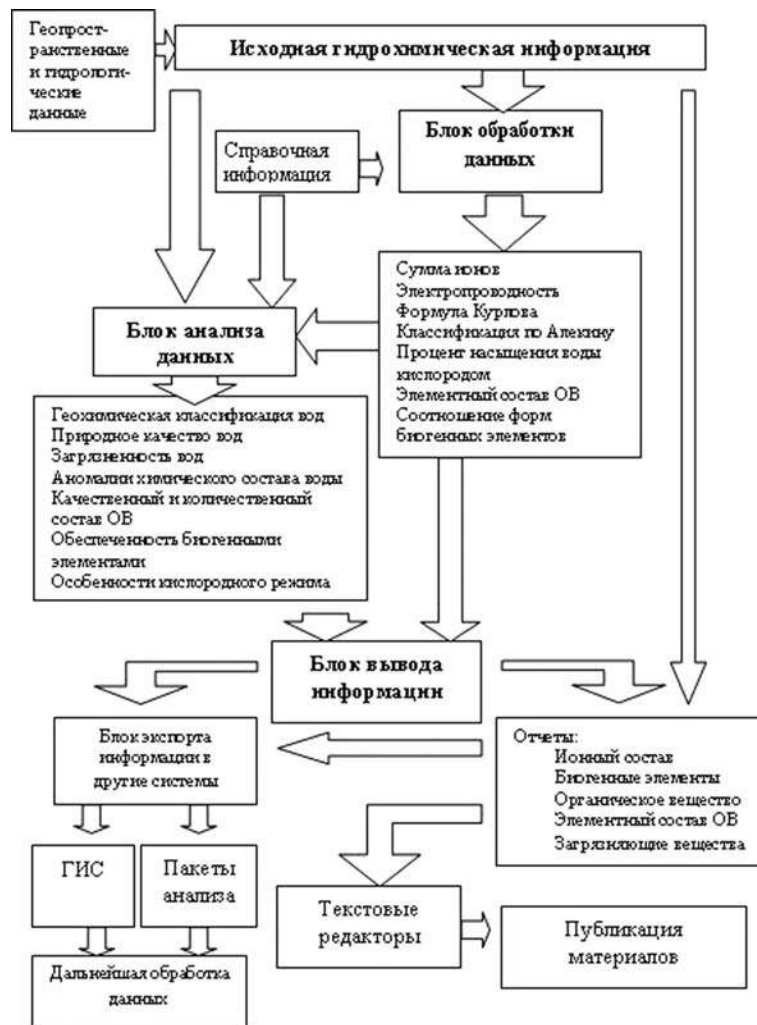


Рис. 1. Схема информационных потоков в системе обработки и анализа гидрохимической информации

Процесс создания автоматизированной системы можно продемонстрировать на примере АИС «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов» (АИС «ОГХИ»; Зобков, а. с., 2010) (рис. 1), классификация водных объектов в которой проводится с использованием теоретических положений геохимической классификации водных объектов (Лозовик, 2006), а именно: по щелочности и рН, гумусности ($\text{Hum}(\sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}})$), $\text{Fe}_{\text{общ}}$, трофности (по содержанию $\text{P}_{\text{общ}}$ с учетом гумусности вод), а также по интегрированному индексу качества воды, учитывающему щелочность, гумусность, трофность воды и степень ее насыщения кислородом.

Суть подхода заключается в использовании двух шкал условно не связанных переменных, расположенных в двумерном Евклидовом пространстве. Поскольку в природных водах обе переменные являются на самом деле зависимыми, что и было положено автором в основу геохимической классификации (Лозовик, 2006), то связь между ними можно задать определенной функцией. При этом выделяемые автором границы классов делят кривую этой функциональной зависимости на конечное число отрезков, равное числу выделяемых классов. Далее задача построения автоматизированной классификационной схемы

сводится к приведению этой кривой к линейному виду и нахождению реперных точек, равноудаленных от границы между соседними классами. Положения реперных точек при автоматизации процесса классификации удобно задавать функциональными зависимостями от номера класса, что значительно упрощает программирование этого процесса при использовании всего одного оператора FOR-TO-DO и сводит к минимуму число возможных ошибок как при создании программы, так и при ее выполнении.

Классификация водных объектов по щелочности основывается на эмпирической зависимости рН воды от ее щелочности, которая имеет четко выраженный экспоненциальный характер:

$$Alk = 2 \cdot 10^{-6} e^{2,34 \cdot pH}$$

Далее эта зависимость была приведена к линейному виду, и ранжирование классов проводилось на координатной плоскости $\lg(Alk) - pH$. В результате были получены уравнения для расчета реперных точек:

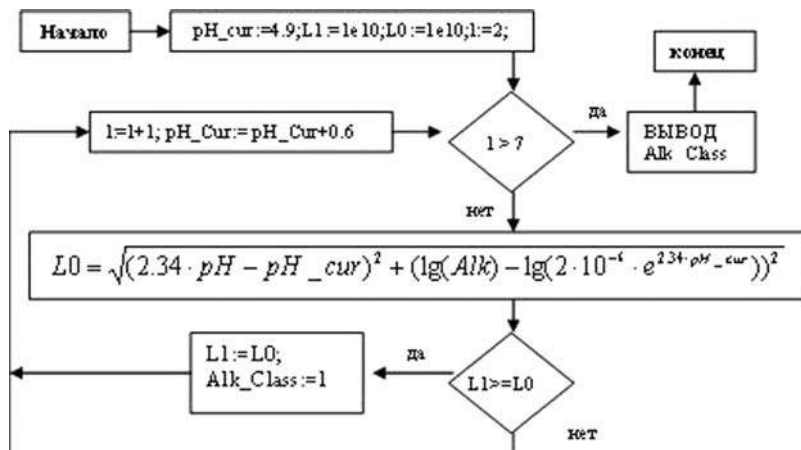
$$pH = 3,7 + 0,6 \cdot n, n = Alk_{class} : 2..7$$

$$Alk = 2 \cdot 10^{-6} e^{2,34(3,7+0,6 \cdot n)}, n = Alk_{class} : 2..7$$

Автоматизированная классификация проводится путем построения семи векторов, началом которых является точка, отображающая классифицируемый объект в координатах $\lg(Alk) - pH$, а концом – поочередно каждая из реперных точек каждого класса. Далее находится кратчайший из этих векторов, и переменной присваивается номер соответствующего класса. Этот алгоритм весьма прост и состоит из одного условного оператора и оператора цикла с перебором классов от 2 до 7 (рис. 2).

Рис. 2. Блок-схема алгоритма классификации водных объектов по щелочности:

Alk_Class – номер класса щелочности, pH_cur – рН текущей реперной точки. pH , Alk – значения рН и щелочности (мг $HCO_3/л$) для классифицируемого водного объекта. l , $L0$, $L1$ – вспомогательные переменные



В результате, с учетом теоретически обоснованного разбиения шкалы рН с шагом 0,6 (Лозовик, 2006), выделено семь классов вод по уровню щелочности (рис. 3, табл. 1).

Рис. 3. Классификация водных объектов по рН и щелочности, где Alk выражено в мг $HCO_3/л$

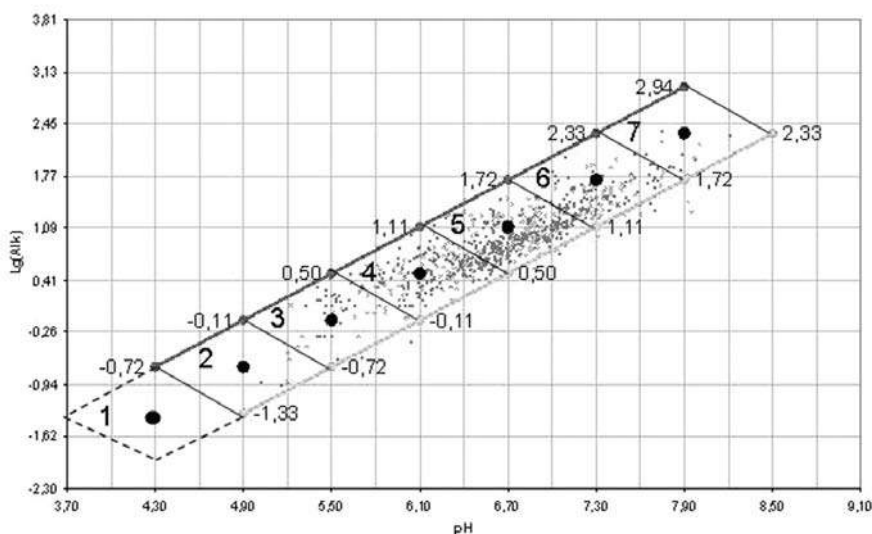


Таблица 1

**Порядковые номера классов щелочности и значения
соответствующей лингвистической переменной**

№ класса	Значение переменной «щелочность»	Координаты реперных точек pH, Alk (lg(Alk))
1	Бесщелочностные кислые	4,3; 0 (–)
2	Низкощелочностные кислые слабокислые	4,9; 0,19 (–0,72)
3	Низкощелочностные слабокислые кислые	5,5; 0,78 (–0,11)
4	Слабощелочностные слабокислые	6,1; 3,16 (0,50)
5	Среднещелочностные слабокислые нейтральные	6,7; 12,88 (1,11)
6	Среднещелочностные нейтральные слабощелочные	7,3; 52,44 (1,72)
7	Высокощелочностные слабощелочные	7,9; 213,5 (2,33)

Классификация водных объектов по гумусности и уровню трофии проводится аналогично, более подробно можно ознакомиться с ней в (Зобков, 2012).

Оценка природного качества вод проводилась по баллам геохимических классов вод с учетом содержания O_2 . Соответствующие классам баллы качества приведены в табл. 2.

Таблица 2

Геохимические классы вод и соответствующие им баллы качества

Баллы качества	Щелочность	Гумусность	Трофность
1	1 – бесщелочностные кислые		1 – гипертрофные –1 – дистрофный класс
2	2 – низкощелочностные кислые слабокислые	2 – полигумусные	2 – высокোটрофные
3	3 – низкощелочностные слабокислые кислые	3 – мезополигумусные	3 – эвтрофные
4	4 – слабощелочностные слабокислые	4 – мезогумусные	–2 – ацидотрофный класс 4 – мезотрофные
5	5 – среднещелочностные слабокислые нейтральные 6 – среднещелочностные нейтральные слабощелочные 7 – высокощелочностные слабощелочные	5 – олигогумусные 6 – ультраолигогумусные	5 – олиготрофные 6 – ультраолиготрофные

Баллы качества по содержанию кислорода при автоматизированной оценке рассчитывались с использованием функции желательности:

$$\begin{cases} O_2_class = -6,1 \cdot \left(\frac{O_2\%}{100}\right)^3 + 7,5 \cdot \left(\frac{O_2\%}{100}\right)^2 + 1,4 \cdot \left(\frac{O_2\%}{100}\right) + 2, & O_2\% \in [0..140] \\ O_2_class = 2, & O_2\% \in (140..\infty) \end{cases}$$

O_2_class – балл качества, $O_2\%$ – процент насыщения воды кислородом. Значения функции округлялись для получения целочисленных баллов. Интегральный индекс качества воды рассчитывался как среднее геометрическое четырех баллов качества, соответствующих классам щелочности, гумусности, трофности, уровню трофии и насыщения воды кислородом. Если данные по насыщению воды кислородом отсутствовали, то при вычислении интегрального индекса качества воды использовались только три показателя (гумусность, щелочность и трофность) и вычислялось их среднегеометрическое значение.

Если воды кислые (класс щелочности ≤ 2) или полигумусные слабощелочностные (класс гумусности 2, класс щелочности ≤ 3), то независимо от полученного результата они относятся к низкому качеству. Аналогично и гипертрофные и дистрофные воды, а также водные объекты, у которых процент насыщения воды кислородом превышает 140 % или ниже 20 %, причисляются к водам с низким качеством.

Основным преимуществом данной классификации относительно других является использование баллов качества, соответствующих их геохимическим классам щелочности, гумусности, трофности и кислородному режиму.

В соответствии с получаемыми баллами были выделены пять основных классов природного качества воды: низкое – $\leq 2,5$, удовлетворительное – 2,6–3,5, хорошее – 3,6–4,5, высокое – $\geq 4,6$. Водные объекты, подверженные антропогенному загрязнению, относятся к отдельной группе «загряз-

ненных» вод. Для таких водных объектов рассчитывались индексы загрязненности воды (ИЗВ) (Методические рекомендации..., 1988) и при наличии достаточного ряда исходных данных – удельные комбинаторные индексы загрязнения воды (УКИЗВ) (РД 52.24.643-2002).

На этапе моделирования производится выбор основных показателей, которые будут участвовать в построении модели, разработка модели, а также выбор групп модельных и тестовых объектов. Под модельными подразумеваются объекты, на основе которых формируется математическое описание модели, поэтому их совокупность должна отражать весь спектр возможных значений, принимаемых основными показателями, а их выбор должен быть соответствующим образом обоснован. Под тестовыми понимаются объекты, для которых известны как основные показатели, так и моделируемые, что в дальнейшем позволит провести верификацию модели и адекватность получаемых данных. При этом важно, чтобы множества модельных и тестовых объектов не пересекались. Рассмотрим процесс моделирования на примере способа оценки гумусности природной воды с применением ГИС (Зобков, 2014).

Территория Республики Карелия характеризуется высокой плотностью озерно-речных систем и малой хозяйственной освоенностью. Наиболее актуальной задачей здесь является оценка природной составляющей качества воды. Вместе с тем труднодоступность и большое число водных объектов не позволяет провести их комплексное изучение. В связи с этим важное значение приобретает разработка методов дистанционной оценки природного качества воды и ее прогнозирование на основе картографической информации и данных дистанционного зондирования Земли. Вследствие значительной заболоченности территории республики одним из основных показателей качества воды расположенных здесь водных объектов является содержание аллохтонного органического вещества, привнесенного с водосбора.

Для поиска взаимосвязей химического состава воды с особенностями водосборной территории предлагается использовать методику, базирующуюся на применении ГИС. Данная методика позволила установить связь между морфометрическими характеристиками водосбора и гумусностью воды на основе модельной группы разнотипных озер Карелии и определить гумусность воды некоторых озер из тестовой группы. В качестве модельных объектов были выбраны 9 разнотипных озер, на которых проводились сезонные измерения в 2011–2012 гг., в качестве тестовых – 17, на которых осуществлялся отбор проб в летний период 2011 г.

Работы в этом направлении предпринимались Jan-Olov Andersson и Lars Nyberg в 2008–2009 гг., когда исследовалось влияние водосборной территории на содержание растворенного органического углерода и другие химические показатели качества воды в водотоках. Авторы получили высокие корреляции для некоторых из этих показателей для водосборов площадью от 1,5 до 4 км² (Andersson, Nyberg, 2009), в то время как для меньших водосборов (от 0,5 до 1,5 км²) (Andersson, Nyberg, 2008) значимых связей найти не удалось.

В данном исследовании в качестве объектов изучения были выбраны озера, поскольку они являются более инертными системами, нежели водотоки, что способствует более плавным изменениям в химическом составе их вод, позволяет получить репрезентативные результаты при сезонном графике отбора проб. Критерий выбора объектов исследования также принципиально отличался от подхода шведских исследователей. Вместо деления по площади водосбора, имевшего место у Jan-Olov Andersson и Lars Nyberg, **в качестве основных критериев отбора были выбраны химические показатели** воды озер, водосборную территорию которых и рассматривали в дальнейшем.

Число озер, расположенных на территории Республики Карелия, достигает 60 000, каждое из них в своем роде индивидуально по химическому составу воды. Поэтому выбор ограниченного числа водных объектов, в полной мере отражающих их природное разнообразие, является не тривиальной научной задачей. Объекты для этого исследования выбирались с учетом многих факторов, таких как степень антропогенного влияния, доступность, удобство для проведения полевых исследований и др. Однако основным требованием являлось максимальное отражение всего разнообразия химических типов поверхностных вод региона в конечной выборке доступных для обследования водных объектов.

Основным источником информации для выбора объектов исследования послужила база данных о химическом составе воды 522 озер. Исходные данные о химическом составе воды были обра-

ботаны с помощью рассмотренной выше программы для ЭВМ «Автоматизированная информационная система Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов» (Зобков, 2010), в результате чего была проведена геохимическая классификация всех занесенных в базу озер по щелочности, гумусности и уровню трофии (Лозовик, 2013). С учетом разработанных требований было выбрано 23 озера, максимально отличающихся по этим трем показателям. На них был проведен отбор проб в летний период 2011 г. Для сезонных исследований в 2012 г. в связи со значительным увеличением числа проб список водных объектов был сокращен до 9, при этом для сохранения полноты выборки при отборе водных объектов использовались данные химического анализа проб воды, полученные летом 2011 г. Водные объекты, на которых проводились сезонные измерения, вошли в модельную группу озер, а озера, где пробы отбирались только в летний период, – в тестовую. Позже тестовая группа озер была дополнена еще двумя водными объектами, отбор проб на которых был проведен в тот же период.

Основным источником данных о строении водосборной территории являлась цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная методом дистанционного зондирования Земли с разрешением 90 м (USGS DEM), а также растровые топографические карты местности масштаба 1 : 100 000 и векторные карты масштаба 1 : 200 000. Обработка картографического материала проводилась с помощью ГИС ESRI ArcGIS с пакетом **SpatialAnalysis (тестовая версия)**, что позволило установить такие морфометрические характеристики водосбора, как его площадь и средний уклон (табл. 3, 4). Верификация контуров водосборных бассейнов проводилась на основе топографической карты масштаба 1 : 100 000. Площадь, занимаемая болотами и озерами на каждом из водосборных бассейнов, была определена с использованием векторных слоев, оцифрованных с карты масштаба 1 : 2 000 000.

Таблица 3

**Основные характеристики водосборной территории
группы модельных водных объектов**

Озеро	Кадастровый номер	Средняя глубина, м	Площадь водосбора, км ²	Площадь болот, км ²	Площадь озер, км ²
Салонъярви	1639	3,9	1838,00	291,30	182,3
Вегарус	1645	4,4	160,10	31,68	16,66
Крошнозеро	1695	5,7	190,90	4,08	24,64
Святозеро	1728	6,8	50,93	0,67	13,06
Урозеро	1750	12	20,52	0,80	14,15
Урос	1803	2,9	6,84	0,40	4,347
Вендюрское	1804	6,1	92,80	13,57	22,55
Яндомозеро	1858	4,3	113,40	14,57	32,6
Валгомозеро	1863	8,8	12,5	0	3,97

Таблица 4

**Основные характеристики водосборной территории
и гумусность группы тестовых водных объектов**

Озеро	Кадастровый номер	Средняя глубина, м	Площадь водосбора, км ²	Площадь болот, км ²	Площадь озер, км ²	Hum
Лугаярви	1660	1,5	142,00	17,81	14,71	34
Яглярви	1661	3	94,52	12,48	11,41	32
Иля-Кялькяярви	1665	1,5	17,75	2,60	1,63	54
Кивач	1700	1,7	85,47	10,85	6,70	52
Палват	1704	1	106,10	15,45	7,56	54
Н. Ротчезеро	1721	2,5	25,43	4,57	3,928	33
Кутиж-озеро	1735	2	123,70	19,60	5,799	98
Мунозеро	1741	14,4	63,19	4,55	17,2	4
Сандал	1831	9,7	6779,00	995,20	947,60	21
Габозеро	1833	1,5	12,24	5,27	3,21	21
Чучъярви	–	4	6,71	1,38	1,24	7
Леликозеро	–	2	6,75	0,00	1,58	6
Ковер-ярви	–	3	9,24	1,19	1,53	34
Падмозеро	1859	4	101,30	16,76	11,66	16
Салонъярви	1639	3,9	1838,00	291,30	182,3	37
Лижемское	1730	6,8	14,36	0,07	4,702	9

В качестве показателя, характеризующего содержание аллохтонного органического вещества, была выбрана гумусность воды. Данные по гумусности воды водных объектов тестовой и модельной групп приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 5

Гумусность воды группы модельных озер в различные сезоны года

Озеро	Весна	Лето	Осень	Зима
Салонъярви	55,60	46,93	79,21	68,19
Вегарус	47,92	38,70	52,21	41,66
Крошозеро	29,58	26,51	23,74	33,70
Святозеро	11,78	15,75	9,20	9,25
Урозеро	3,39	3,36	6,44	3,23
Урос	6,18	5,79	6,98	3,77
Вендюрское	15,19	12,51	13,08	8,84
Яндомозеро	10,32	13,25	27,31	11,95
Валгомозеро	10,32	12,57	14,30	7,89

Большинство исследователей отталкивались от предположения, что основное влияние на привнесение аллохтонного органического вещества с водосборной территории оказывают болота, с которых поступают воды с высокими значениями ЦВ и ПО и, соответственно, гумусностью. Однако по нашим данным значимой корреляции между коэффициентом заболоченности водосбора и гумусностью не наблюдалось ($R^2 = 0,21$). В связи с этим мы отошли от общепринятого представления и провели поиск корреляционных зависимостей для других факторов, которые могли бы повлиять на гумусность воды: в частности, средний уклон водосбора, а также средний уклон его негоризонтальной поверхности (водосборной территории за вычетом площадей болот и озер), отношение площади всех болот на водосборе к площади всех озер и к объему воды в исследованных озерах (на основании расчетных данных о площади и справочных данных о средней глубине), а также их различные комбинации.

Наибольший коэффициент корреляции ($R^2 = 0,83$) был получен для следующей комбинации характеристик водосбора:

$$S_f = \frac{S_{wat}}{S_{wh} - S_{wat} - S_{mash}},$$

где S_{wat} – площадь всех водных объектов на водосборе, S_{wh} – площадь водосборной территории, S_{mash} – площадь всех болот на водосборной территории. Если внимательно рассмотреть данную формулу и учесть, что площадь поселений и сельхозугодий на рассматриваемых водосборах пренебрежимо мала, можно принять, что знаменатель является не чем иным, как площадью территории водосбора, покрытой лесом. Таким образом, коэффициент S_f будет выражать отношение площади водных объектов, находящихся на водосборе рассматриваемого озера, к площади лесов. Данная зависимость имеет экспоненциальный характер (рис. 4).

Учитывая это, можно предположить, что болота выполняют лишь роль аккумуляторов органического вещества, в то время как его основным источником являются участки водосбора, покрытые лесом. Данное предположение выглядит логичным и с точки зрения общей биологической продуктивности болот и лесов – для вторых она на порядок больше. Вместе с тем малая площадь озер на водосборе способствует быстрому выносу ОВ с его территории, в то время как на водосборах с большой озерностью происходит его частичная ассимиляция.

Данная зависимость была проверена на группе модельных водных объектов. Результаты расчета приведены в табл. 6. Как видно из табл. 6, наибольшее отклонение расчетного показателя гумусности от наблюдаемого составило около 25 ед. для высоко-

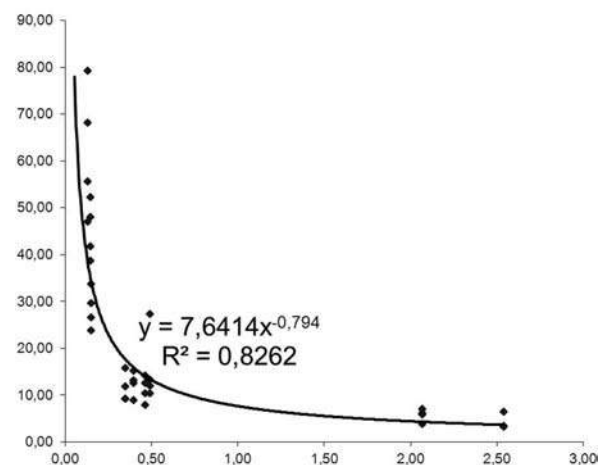


Рис. 4. Зависимость гумусности воды от коэффициента S_f для модельной группы озер

гумусного озера Кутиж-озеро, в то время как относительная погрешность была наибольшей для низкогумусных водных объектов: для них расчетные значения превышали наблюдаемые до 2,5 раза. Вместе с тем дисперсия в разности предсказания составила 10 единиц гумусности, что можно считать хорошим результатом. Также необходимо учесть, что данная зависимость получена для сезонных наблюдений и отображает среднее значение гумусности за сезон, в то время как на группе тестовых озер отбор проб осуществлялся только в летний гидрологический сезон, в который, как правило, содержание растворенного органического вещества в воде несколько ниже.

Таблица 6

**Сравнение реальных значений гумусности воды
с расчетными для модельной группы озер**

Озеро	Sl	Hum расч.	Hum набл.	Разность	% откл.
Салонъярви	0,13	38	37	–0,32	1
Яглярви	0,16	32	32	–0,86	3
Палват	0,09	51	54	3,08	6
Кивач	0,10	48	52	4,36	8
Луглярви	0,13	38	34	–3,22	9
Иля-Кялькяярви	0,12	41	54	12,74	24
Кутиж-озеро	0,06	72	98	25,26	26
Н. Ротчезеро	0,23	24	33	8,98	27
Ковер-ярви	0,23	24	34	9,44	28
Сандал	0,20	28	21	–7,07	34
Крошнозеро	0,15	34	24	–9,98	41
Лижемское	0,49	13	9	–4,87	57
Габозеро	0,85	9	21	12,13	58
Падмозеро	0,16	33	16	–17,14	110
Чучъярви	0,30	20	7	–12,54	175
Леликозеро	0,30	20	6	–13,24	207
Мунозеро	0,42	15	4	–10,95	248

Заключение

Предлагаемый здесь подход позволил установить некоторые закономерности в формировании гумусности воды для обширной территории региона (на примере Республики Карелия), в результате чего была создана модель, позволяющая с достаточной степенью вероятности прогнозировать гумусность как одну из составляющих природного качества воды озер по цифровой модели рельефа и другой картографической информации.

Важным фактором является то, что данный подход может быть алгоритмизирован и применен и к другим показателям качества воды, что позволит в дальнейшем создать геоинформационную систему прогнозирования природного качества воды.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные способы организации информации в базе данных.
2. Какие способы снижения размерности данных Вам известны?
3. Какие основные задачи решаются при моделировании природных процессов?
4. В чем проявляется различие в модельном и тестовом наборе данных?
5. Как численно можно охарактеризовать правильность (адекватность) построенной модели?

Литература

Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

Зобков М. Б. Автоматизированный экспертный анализ состояния водных объектов Республики Карелия // Сб. ст. по материалам конф. «Северные территории России: проблемы и перспективы развития». CD, № гос. регистрации: 0320800990. Институт экологических проблем Севера УрО РАН. Архангельск, 2008.

Зобков М. Б. А. с. 2010612351 РФ на программу для ЭВМ Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов (АИС „ОГХИ“» от 31.04.2010 // Бюл. RU ОБПБТ, 2010. № 2 (71). С. 563.

Зобков М. Б. Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 21 с.

Зобков М. Б. Дистанционная оценка гумусности природной воды методом геоинформационного моделирования // Материалы V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. 23–27 июня 2014 г. Апатиты, 2014. С. 53–58.

Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. и др. Основы геоинформатики: В 2-х кн. Кн. 1. М.: Академия, 2004. 352 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 60 с.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–593.

Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. М.: Госкомгидромет, 1988.

РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям: Метод. указания. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 50 с.

Andersson J.-O., Nyberg L. Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams // Hydrol. Process. 2008. 22. P. 1965–1975.

Andersson J.-O., Nyberg L. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2009. 13. P. 537–549.

Codd E. Chapter 6 in Funding a Revolution: Government Support for Computing Research. Washington DC, USA, National Academy Press, 1999.

USGS DEM. The National Map – Elevation. <http://nationalmap.gov/elevation.html> (электронный ресурс).

РАЗРАБОТКА АТЛАСА БЕЛОГО МОРЯ

А. В. Толстиков

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

При освоении ресурсов Арктики возрастает интерес к Белому морю как важному объекту для развития водного и наземного транспорта, прокладки трубопроводов, добычи алмазов, выращивания марикультуры, развития туризма и рекреационной деятельности, использования в качестве полигона для новых судов (Филатов и др., 2011). Требуется совершенствование систем раннего прогнозирования чрезвычайных ситуаций, способных привести к негативным социально-экономическим и экологическим последствиям в регионе. Эффективным средством, используемым при решении разнообразных практических задач, являются комплексные атласы (Филатов и др., 2014). Ранее были разработаны и опубликованы тематические атласы и справочные издания, в которых изложены лишь разрозненные сведения о Белом море. Поэтому основная цель проекта – создать новый атлас Белого моря силами исследователей нескольких институтов РАН, имеющих большой опыт работы на Белом море и уникальный массив данных, собранных по этому водному объекту за несколько десятилетий.

В новом атласе будет представлена комплексная, обобщенная за все время исследования информация о Белом море, собранная в основном коллективами сотрудников Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск), Зоологического института РАН (г. Санкт-Петербург), Института океанологии РАН (г. Москва). Эти работы проводились в рамках Федеральных целевых программ (программа «Мировой океан», раздел «Белое море», руководитель проекта академик Г. Г. Матишов, руководитель раздела по Белому морю чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов), программ фундаментальных исследований РАН («Система Белого моря», руководитель академик А. П. Лисицын), нескольких проектов РФФИ (руководители чл.-корр. РАН Ю. С. Долотов и чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов), между-

народного проекта INCO-Corpermicus, где Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН принимал активное участие. Необходимо создать картографическое произведение, которое можно использовать для принятия управленческих решений при проектировании, разработке научных рекомендаций рационального использования и охраны ресурсов моря, туризма (Природные..., 2010), а также для решения научных и учебных вопросов.

Материал, представленный в статье, может быть использован для студентов географических специальностей в курсах, связанных с изучением Белого моря и его водосбора, а также в школьном курсе социально-экономической географии России.

Изложение материала

Для начала вспомним, что же называется атласом. *Географический атлас – это систематическое собрание географических карт, выполненное по общей программе в виде альбома* (Краткая географическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1960. Т. 1. С. 153). В настоящее время любой разрабатываемый атлас может быть не только напечатанным на бумаге, но и электронным, что во многом ускоряет и упрощает работу с ним, а также значительно расширяет возможности для пользователя. Такие электронные ресурсы по отдельным объектам обычно называются информационно-справочными системами, и последние часто имеют даже свои собственные названия. Большой опыт создания информационно-справочных систем у европейских стран, где силами 14 государств создана MARE-NEST (Savchuk, Wulff, 2009; HELCOM, 2009), система, применяемая для решения научных и практических задач управления водными ресурсами. Разработаны атласы системы Великих Американских озер, Байкала, Ладожского (Интегрированное..., 2001) и Онежского озер, Азовского моря. Иногда параллельно создаются сразу две версии атласов: «электронная» и «бумажная». Однако преимущества и недостатки электронных систем перед печатным изданием – отдельная тема для разговора.

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 «бумажных» тематических атласов и информационно-справочных систем. В частности, Зоологическим институтом РАН совместно с NOAA (США) создана электронная версия атласа Белого моря (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/index1.html). По проекту Sustainable Management of the Marine Ecosystem and Living Resources of the White Sea (WHITESEA), где принимали участие российские и иностранные ученые из Норвегии (Университет Бергена, Центр окружающей среды и дистанционных методов), Германии (Университет Макса-Планка), Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, также создан электронный атлас Белого моря.

Новый атлас Белого моря Института водных проблем Севера КарНЦ РАН состоит из набора карт, расположенных в определенной последовательности. Его можно отнести к региональным географическим атласам. Здесь, помимо опыта предыдущих издателей, используются современные базы данных и знаний по Белому морю, полученные в работах В. В. Сапожникова (1994), Г. Г. Матишова и др. (2004), Н. Н. Филатова с соавторами (Белое море..., 2007; The White Sea..., 2005), В. Я. Бергера (2007), А. Ф. Алимова с соавторами (Белое море..., 1995), Б. Г. Житнего (2007), А. П. Лисицына с коллегами (Система Белого моря..., 2010, 2012, 2013). В указанных работах рассматривались различные аспекты состояния моря, особенности его продуктивности, загрязнения, моделирования процессов, пути рационального использования ресурсов.

Ниже приведены библиографические данные ранее изданных атласов и электронных систем по Белому морю с их краткими характеристиками.

– Атлас Белого моря с прилежащими заливами Онежским и Канда拉克шским, сочинил генерал-лейтенант Голенищев-Кутузов [СПб., 1825–1827]. Этот первый атлас Белого моря, составленный Л. И. Голенищевым-Кутузовым, долгое время считался одним из лучших морских картографических произведений России.

– 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. I: Белое море. 1850. 567 с. разд. паг., карт., ил.; Ч. II: Лапландский берег. 1843. 373 с. разд. паг., табл., ил.

– Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря (Аннотированный атлас). Мурманск: ПИНРО, 1991. 115 с. 101 карта. Создан по результатам проекта ГКНТ СССР «Белое море» 1981 г. Проект был направлен на повышение продуктивности Белого моря. Основные организаторы и исполнители проекта: Зоологический институт и Институт океанологии АН СССР, ВНИРО, ПИНРО, СевПИНРО, Ихтиологическая комиссия. В многолетнем проекте «Белое море» в отдельные годы участвовало более 30 организаций.

– Атлас течений Белого моря. УГС ВМФ. 1962. Издан Управлением гидрографической службы ВМФ СССР. Здесь приведены карты суммарных течений Белого моря.

– Биологический атлас морей Арктики 2000: планктон Баренцева и Карского морей. В 2000 г. издан Мурманским морским биологическим институтом КНЦ РАН в виде электронного атласа. Составители: Г. Матишов, П. Макаревич, С. Тимофеев, Л. Кузнецов, Н. Дружков, В. Ларионов, В. Голубев, А. Зуев, Н. Адров, В. Денисов, Г. Ильин, А. Кузнецов, С. Денисенко, В. Савинов, А. Шавыкин (Мурманский морской биологический институт) и И. Смоляр, С. Левитус, Т. О'Брайан, О. Баранова (Мировой центр данных по океанографии, Silver Spring, Лаборатория морского климата, NODC/NOAA, США). Помимо Баренцева и Карского морей, в этот атлас вошли и данные, полученные ММБИ КНЦ РАН по температуре, солености, зообентосу, фито- и зоопланктону Белого моря за период 1913–1999 гг.

– Климатический атлас морей Арктики 2004: Часть Базы данных Баренцева и Белого морей – океанография и морская биология. Составители: Матишов Г. Г., Зуев А. Н., Голубев В. А., Адров Н. М., Тимофеев С. Ф., Карамушко О. В., Павлова Л. В., Браунштейн А. А., Фадякин О. Ю., Бузань А. П., Моисеев Д. В., Смоляр И., Локарнини Р., Татушко Р., Бойер Т., Левитус С. Отдельное издание для Баренцева и Белого морей.

– 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) разработан в 2003 г. Авторы: О. М. Йоханнесен, Л. Х. Петтерсон, Д. В. Поздняков, С. Каитала, Л. П. Бобылев, Н. Н. Филатов, В. В. Денисов, В. К. Донченко. Участники проекта: 1) Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск; 2) Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманск; 3) Nansen Environmental and Remote Sensing Centre, Норвегия; 4) Finnish Institute of Marine Research, Финляндия; 5) Нансеновский международный центр дистанционных методов и окружающей среды, Санкт-Петербург и 6) Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург. Атлас содержит обобщающую информацию по проекту: лицензированные батиметрические карты Белого моря, данные по антропогенному загрязнению водоема, данные по изменению экосистем моря, спутниковые снимки, анализ социально-экономической обстановки на водосборе до 2000 г.

– Электронный атлас 36-Year Time Series (1963–1998) of Zooplankton, Temperature and Salinity in the White Sea. Подготовлен ББС ЗИН РАН в 2003 г. Исполнители: Беломорская биологическая станция ЗИН РАН им. О. А. Скарлато (В. Я. Бергер, А. Д. Наумов, Н. В. Усов, М. А. Зубаха) и World Data Center for Oceanography, Silver Spring, Ocean Climate Laboratory (I. Smolyar, R. Tatusko, S. Levitus). Атлас доступен в Интернете по адресу: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html.

– Иллюстрированный атлас беспозвоночных Белого моря / Ред. Н. Н. Марфенин. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. 312 с. В атласе представлена иллюстрированная информация о морских обитателях Белого моря, цветные фотографии, описания более 160 видов мелководных беспозвоночных: особенности морфологии, биологии, экологии, поведения вида, мест обитания, отличия от похожих видов. Атлас может быть использован при проведении полевых практик у студентов-биологов, полезен всем интересующимся морской фауной, туристам и подводникам.

– Информационно-справочная система «Белое море». Разработана в 2007 г. в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН совместно с Институтом прикладных математических исследований КарНЦ РАН. Авторы электронной оболочки В. Г. Старкова, С. В. Брагин, а данных – ИВПС КарНЦ РАН. Проекты хранятся на сервере и посылаются клиенту по требованию.

– База данных «Белое море и его водосбор» разработана в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН, № гос. рег. 2010620435. Зарегистрирована 16 августа 2010 г. Составители: А. В. Толстиков, Н. Н. Филатов, Р. Э. Здоровеннов. База содержит данные по Белому морю, собранные Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН, общую морфометрическую информацию по Белому морю, спут-

никовые снимки, результаты моделирования, полученные в ходе индивидуальных и совместных проектов института, связанных с беломорской тематикой.

– Флора и фауна Белого моря: иллюстрированный атлас под ред. А. Б. Цетлина, А. Э. Жадан, Н. Н. Марфенина. Атлас разработан в 2010 г., дает представление об особенностях морфологии, биологии, экологии, поведении каждого вида, местах обитания, об отличиях похожих видов. Организации, участвовавшие в создании атласа: Зоологический институт РАН (г. Санкт-Петербург), Беломорская биостанция МГУ им. Н. А. Перцова, Беломорская биологическая станция ЗИН РАН им. О. А. Скарлато «Мыс Картеш». Все очерки написаны специалистами по соответствующим группам животных и растений. Каждый очерк иллюстрирован подводными и лабораторными фотографиями, сделанными более чем 30 фотографами за 10 лет работы (более 1500 фотографий). В атлас включены очерки о природных особенностях Белого моря и описания основных биотопов.

– Атлас-определитель макрофитов Белого моря / Ред. М. М. Болдунан. М., 2011. 160 с. Атлас содержит изображения и описание около 120 видов беломорских макрофитов из 68 родов. Кроме водорослей, в атлас вошли два вида цветкового растения zostеры. Каждый из родов имеет минимум одну цветную иллюстрацию. Это практический определитель макрофитов.

– Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. М.: WWF России, 2011. 64 с. Атлас подготовлен специалистами ведущих научных учреждений РАН, высшей школы, Министерства природных ресурсов и экологии РФ и Росрыболовства. В атласе содержатся сведения по мейофауне, макрозообентосу, видовому разнообразию рыб, рыбообразных и морских птиц, информация о динамике ледяного покрова, морфогенетических особенностях берегов, динамике растительности маршей, особо охраняемых природных территориях, в том числе и по Белому морю.

– Электронный атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана», входит в Единую систему информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). 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 многолетний период, а также материалов, полученных в рамках проектов 4-го направления ЕСИМО ФЦП «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. Ссылка на атлас Белого моря: http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1_1.html.

В новом атласе (Филатов и др., 2014), разрабатываемом ИВПС КарНЦ РАН, приведены данные по акватории Белого моря и состоянию водосбора: географическое положение, климат, гидрологический режим, гидробиологические и гидрохимические особенности и др. Со временем будут даны прогностические оценки изменения состояния Белого моря по результатам расчетов на трехмерной численной модели JASMINE (Яковлев, 2009; Чернов, Толстиков, 2014).

Комплексный атлас Белого моря состоит из нескольких глав (рис.): 1. Тектоника и геология; 2. Климат; 3. Гидрология; 4. Гидробиология; 5. Гидрохимия; 6. Результаты моделирования; 7. Социально-экономика; 8. ООПТ и рекреация; 9. Литература; 10. Электронные ресурсы (ссылки). Все главы содержат тематические разделы, указаны составители и организация, в которой разработан представленный материал.

Заключение

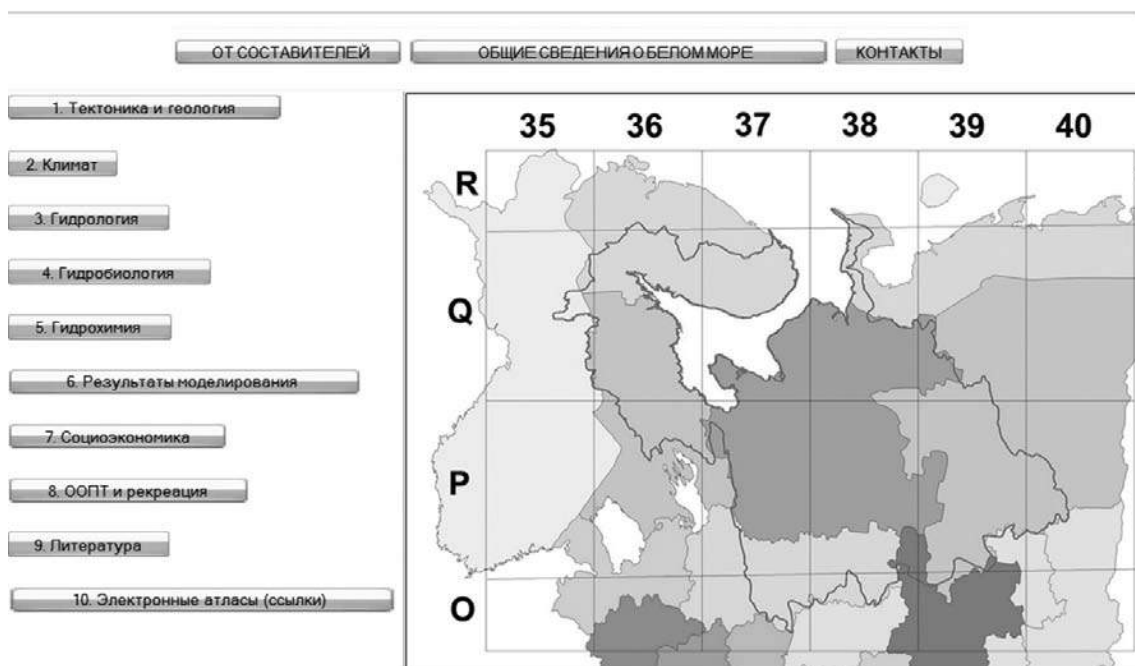
Разрабатываемый многоцелевой электронный атлас Белого моря найдет применение в задачах рационального использования ресурсов моря и водосбора, туризме, прогнозе состояния моря при различных природных и антропогенных изменениях (учитывая сценарии развития), при возможных чрезвычайных ситуациях, когда требуется оперативная реакция на произошедшее событие.

Электронный атлас, а позднее, возможно, его печатная версия помогут ответить на актуальные вопросы:

- Что будет с Белым морем и его водосбором при изменении климата?
- Какова возможная реакция моря на динамику экономической активности на территории водосбора?



АТЛАС БЕЛОГО МОРЯ



Интерфейс атласа Белого моря

– Как будут откликаться экосистемы моря на изменения при разных сочетаниях воздействия климата (потепление, похолодание) и антропогенной деятельности?

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 13-05-98802.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое географический атлас?
2. Как комплексные атласы водных объектов помогают решать управленческие задачи экономики регионов?
3. Какими принципами Вы бы руководствовались при создании нового атласа хорошо изученного водного объекта?
4. Какая информация для широкого круга пользователей в атласе наиболее интересна?
5. Какие атласы Белого моря актуальны на сегодняшний день?

Литература

Атлас Белого моря с прилежащими заливами Онежским и Кандалакшским, сочинил генерал-лейтенант Голенищев-Кутузов. СПб., 1825–1827.

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. I: Белое море. 1850. 567 с. разд. паг., карт., ил.; Ч. II: Лапландский берег. 1843. 373 с. разд. паг., табл., ил.

Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. М.: WWF России, 2011. 64 с.: ил.

Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013) / Ред. Матишов Г. Г., Шерман К., Левитус С. NOAA Atlas NESDIS 69, U. S. Gov. Printing, Wash., D. C., 2004. 250 p.

Атлас-определитель макрофитов Белого моря / М. М. Болдуман. М., 2011. 160 с.: ил.; 22,5 см. Библиогр.

- Атлас течений Белого моря. Управление гидрографической службы ВМФ СССР. 1962.
- Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Ч. I, II. СПб., 1995.
- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.
- Бергер В. Я. Продукционный потенциал Белого моря / Исследования фауны морей. Т. 60 (68). СПб: Зоол. ин-т РАН, 2007. 292 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1 и 2: Белое море. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
- Житний Б. Г. Биологические ресурсы Белого моря и их промысловое использование / Под ред. В. Д. Федорова. Петрозаводск: Союз рыбопромышленников Карелии; КарНЦ РАН, 2007. 268 с.
- Иллюстрированный атлас беспозвоночных Белого моря / Ред. Н. Н. Марфенина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. 312 с.
- Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области / Под ред. Алимова А. Ф., Руховца Л. А., Степанова М. М. СПб.: Borey Print, 2001. 419 с.
- Комплексные исследования экосистемы Белого моря / Под ред. Сапожникова В. В. М.: ВНИРО, 1994. 120 с.
- Матишов Г. Г., Зуев А. Н., Голубев В. А. и др. Климатический атлас морей Арктики. Часть Базы данных Баренцева и Белого морей – океанография и морская биология. Silver Spring, MD, 2004. 148 с.
- Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря (Аннотированный атлас). Мурманск: ПИНРО, 1991. 115 с.
- Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер: по маршруту экспедиции Русского географического общества «Историко-географические памятники Европейского Севера России» [Текст] / М. С. Богданова, С. П. Гриппа, Н. В. Лобанова и др. Петрозаводск: Verso, 2010. 95 с.
- Система Белого моря. Природная среда водосбора Белого моря. Т. 1. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
- Система Белого моря. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. Т. 2. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
- Система Белого моря. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения. Т. 3. М.: Научный мир, 2013. 668 с.
- Толстиков А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э. Белое море и его водосбор / Свид. о гос. рег. базы данных № 2010620435. 16 августа 2010 г.
- Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Тержевик А. Ю. Беломорье – регион для решения актуальных проблем Арктики // Арктика: Экология и экономика. 2011. № 2. С. 91–101.
- Филатов Н. Н., Толстиков А. В., Богданова М. С. и др. Создание информационной системы и электронного атласа по использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 18–29.
- Флора и фауна Белого моря: Иллюстрированный атлас / Под ред. А. Б. Цетлина, А. Э. Жадан, Н. Н. Марфенина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 471 с.: ил. 1580.
- Чернов И. А., Толстиков А. В. Визуализация и сравнение результатов моделирования термохалинных и гидродинамических полей Белого моря / Свид. об офиц. рег. программ для ЭВМ № 2014618474. 21 августа 2014 г.
- Чернов И. А., Толстиков А. В. Численное моделирование крупномасштабной динамики Белого моря // Труды КарНЦ РАН, сер. Математическое моделирование и информационные технологии. 2014. № 4. С. 137–142.
- 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.
- HELCOM: Eutrophication in Baltic Sea. N 115A. Helsinki. Commission. 2009. 20 p.
- Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of largescale nutrient cycles in the entire Baltic Sea // Hydrobiologia. 2009. N 629. P. 209–224.
- 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.
- Атлас Белого моря «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Электронный атлас Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). ВНИИГМИ МЦД. Обнинск. Режим доступа: <http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/index.html>.
- 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). 2003.
- Berger V. Ja., Naumov A. D., Usov N. V. et al. 36-Year Time Series (1963–1998) of Zooplankton, Temperature and Salinity in the White Sea. St.-Petersburg, 2003. 362 p. Режим доступа: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html.

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭСТУАРИЯХ

М. К. Чебанова

Институт водных проблем РАН

В работе рассмотрены различные признаки, определяющие эстуарий, а также факторы, влияющие на формирование особенностей его гидрологического режима, дана характеристика гидрофизических процессов и классификация эстуариев, приведены основные теоретические и эмпирические подходы к изучению интересного гидродинамического явления в эстуариях – интрузии (проникновения) соленых вод. Данный материал может быть использован студентами географических специальностей при изучении процессов в эстуариях и шельфовой зоне Мирового океана.

Эстуарии – переходные зоны между морскими и пресными водными объектами с выраженным градиентом солености и изменчивым гидрологическим режимом. Они являются зонами транзита терригенного и органического осадка с материка в океан. Здесь взвешенные и растворенные вещества аккумулируются и сильно трансформируются, благодаря чему создаются и поддерживаются весьма специфические условия для жизни многих организмов. Таким образом, эстуарии служат своеобразным фильтром на пути загрязненного материкового стока, при этом являясь одной из наиболее продуктивных и доступных для эксплуатации зон Мирового океана.

По определению Притчарда, эстуарий – это полужакрытый прибрежный водоем, который имеет свободный обмен с морем и в котором морская вода разбавляется пресной водой, стекающей с суши. Однако в этом определении границы эстуария остаются достаточно неопределенными. Кетчум предложил считать границей эстуария со стороны суши то поперечное сечение, для которого объем воды, участвующий в повышении уровня воды от отметки малой воды до отметки полной воды во время прилива, равен объему речного стока за половину приливно-отливного цикла (Хублярян, Фролов, 1988). Эта граница является динамической и изменяет свое положение в зависимости от колебаний речного стока. Морскую границу эстуария определить еще сложнее из-за постепенного увеличения солености в шельфовой зоне. Крупные реки образуют «плюмы» пресной воды, которая плавает на более плотной морской и может распространяться на многие десятки и даже сотни километров. Эстуарии могут быть классифицированы на геоморфологической основе, по типу распределения солености и плотности, а также по характеру основного типа циркуляционных течений на несколько больших классов.

По геоморфологическим признакам эстуарии подразделяются на следующие типы: 1) затопленные речные долины; 2) эстуарии фьордового типа; 3) эстуарии, образованные параллельной берегу песчаной банкой; 4) эстуарии тектонического типа (Хублярян, Фролов, 1988).

Факторы, определяющие гидрологический режим эстуария. Основные факторы, определяющие гидрологический режим эстуария, – речные (уровни и расходы воды в реке, ледотермический режим, сток наносов, химические и физические свойства воды и т. д.) и морские (уровень воды, течения, ветровое волнение, приливы, физические и химические свойства морской воды, вдольбереговой поток наносов и др.). Существенными могут быть и другие факторы: геологические, физико-географические, такие как климат, рельеф и др., и антропогенные (дноуглубительные и выправительные работы, регулирование стока и т. п.) (Долгополова, Исупова, 2010; Михайлова, 2013). Эти факторы различны для разных эстуариев, а также могут иметь межгодовые, сезонные и кратковременные изменения в пределах одного эстуария.

Проблемы изучения физики эстуариев. В эстуариях возникают самые разнообразные физические процессы, вызванные взаимодействием стратифицированных потоков: плотностные течения, неустойчивость, внутренние волны, турбулентный пограничный слой и т. п. Многообразие процессов с различными периодами, а также тот факт, что благодаря своим относительно небольшим размерам эстуарии быстро реагируют на изменение внешних условий, делают их сложными для изучения. В настоящее время рассматриваются прежде всего вопросы неустойчивости течений и генерации внутренних волн, процессы смешения в стратифицированных потоках, процессы маломасштабного перемешивания, вызванного приливами, и их роль в остаточной циркуляции, влияние изменчивости речного стока на остаточную циркуляцию в эстуарии (Долгополова, Исупова, 2010).

Гидрофизические особенности эстуариев. Взаимодействие речных и морских вод. Процесс смешения морских и речных вод и эстуарная стратификация водной толщи обусловлены взаимодействием двух факторов: величиной речного стока в вершине эстуария и величиной прилива в устье реки. В результате взаимодействия приливных и стоковых течений возникает остаточная циркуляция, интенсивность которой определяется морфологией эстуария, ветровым воздействием и расходом речного потока. Циркуляция в боковом направлении также важна для продольной дисперсии веществ (Хубларян, Фролов, 1988). Уменьшение расхода приводит к непропорционально большему увеличению солёности воды в зоне смешения, увеличение расхода, наоборот, вызывает быстрое уменьшение солёности. Причинами изменений расхода реки могут быть естественные многолетние и сезонные колебания стока, изменение режима стока воды в результате зарегулирования реки, крупномасштабный водозабор из реки.

Величина приливов зависит от географического положения эстуария. Диапазон изменений величины приливов очень широк. Так, величина прилива в эстуариях рек Мезени и Кулоя, впадающих в Белое море, изменяется в диапазоне 4,6–7,8 м. Величина прилива в эстуарии, наравне с величиной расхода реки, определяет характер вертикального перемешивания и стратификации вод (Долгополова, Исупова, 2010).

По величине прилива выделяют четыре типа эстуариев: микроприливные (величина прилива <2 м), мезоприливные (2–4 м), макроприливные (4–6 м) и гиперприливные (>6 м). Если величина прилива менее 0,3 м, то при решении определенных задач допускается считать такие эстуарии неприливыми (Михайлова, 2013).

Приливные колебания уровня на входе в эстуарий вызывают изменения наклона свободной поверхности, которые проявляются в распространении гравитационных волн в глубь эстуария. Скорость распространения волны зависит от уровня прилива в эстуарии и обычно больше 2,5 м/с (Мак-Дуэлл, О'Коннор, 1983). Скорость приливной волны падает с уменьшением глубины, поэтому на мелководьях приливная волна деформируется. Если в мористой части полусуточный прилив имеет правильный характер (среднее время роста уровня приблизительно равно времени его падения) и средний период составляет примерно 12 ч 25 мин, то в эстуарии уменьшается не только величина прилива, но и время падения уровня оказывается больше времени его роста. Так, например, для эстуария р. Кеми величина прилива уменьшается на 30 см, время падения уровня оказывается больше времени его роста примерно на 1,5 ч. Продолжительность приливного течения составляет 4–5 ч, а отливного – 7–8 ч. Смена приливного течения на отливное происходит в течение часа после момента полной воды, а отливного на приливное – через 1,5–2 ч после малой воды, что связано с нелинейным характером трансформации приливной волны на мелководье и влиянием речного стока (Белое море..., 2007; Долотов, 2011).

Отлив приводит к падению уровня у мористого края эстуария и к процессу поверхностного стекания вод под действием силы тяжести. Если в эстуарии существуют обширные зоны мелководий, то процесс стекания по главному руслу удлиняется за счет масс воды, увлекаемых с отмелей (Михайлова, 2013). Вынос речных вод в отлив происходит более интенсивно, чем проникновение морских вод в устье с приливом. В начале прилива некоторое время продолжается вынос речных вод в море в поверхностном слое, хотя в остальной толще уже начинают поступать морские воды.

Характерная гидрофизическая черта эстуариев – увеличение солёности и плотности воды по направлению от речного края эстуария к морскому и от поверхности ко дну, что хорошо видно на рис. 1, на котором представлен разрез эстуария р. Кеми от мористой части к устью реки, и на рис. 2, где показаны вертикальные профили солёности на каждый час приливоотливного цикла за период 14.07.2009 18:00 по 15.07.2009 10:00 для этого же эстуария. Так, из рис. 1 видно, что в приустьевой части эстуария р. Кеми с глубинами 2–3 м (станции 1-01 и 033) не обнаружено заметной стратификации вод, вызванной влиянием приливов, преобладает преимущественно речная водная масса с высоким значением мутности (рис. 1). В зоне смешения речных и морских вод (станции 037, 033А, 038, 027А и 027) уже заметно влияние морских вод: в фазу прилива солёность повышается до 18–24 ‰, в фазу отлива она составляет 6–17 ‰. В переходной зоне эстуария р. Кеми обнаружена стратификация вод с двумя четко выраженными слоями: верхним с максимальной температурой и минимальной солёностью и нижним с минимальной температурой и максимальной солёностью, разделенными слоем

скачка (Долотов, 2011). В мористой части эстуария (станции 043, 1-03, 1-04) в фазу отлива распространился только верхний слой (3–4 м), распределение солёности в прилив близко к однородному. В вертикальном направлении (рис. 2) солёность возрастает от поверхности ко дну эстуария, при этом профиль солёности изменяется в зависимости от фазы прилива.

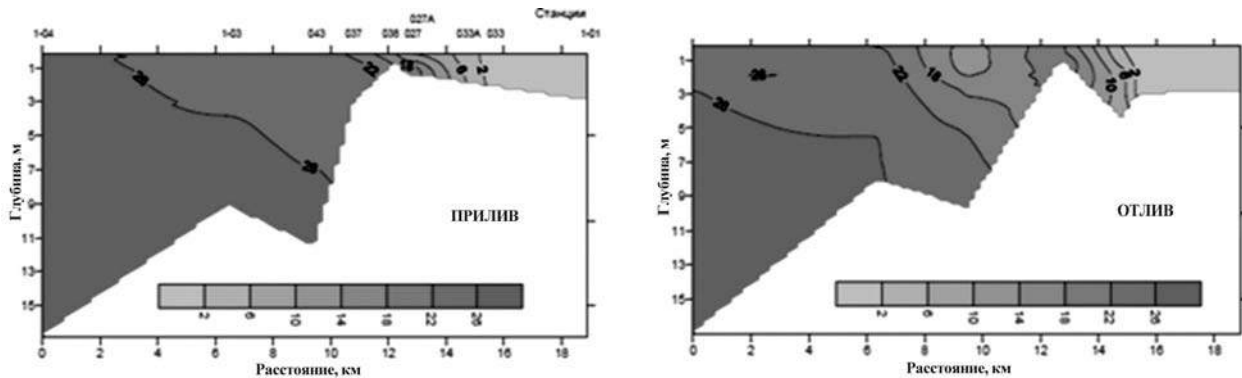


Рис. 1. Вертикальное распределение солёности по разрезу (по: Долотов, 2011)

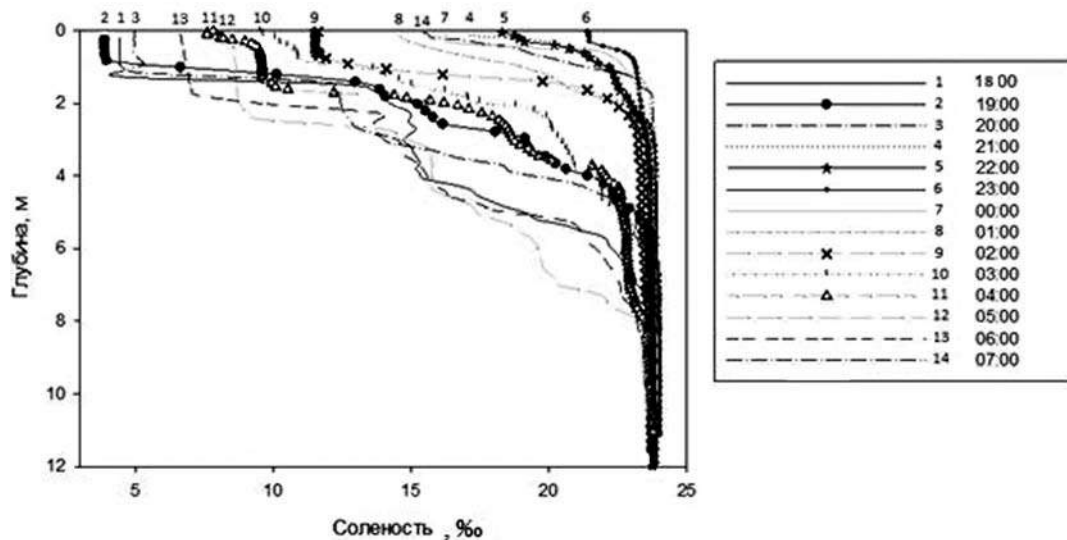


Рис. 2. Суточный ход распределения солёности по глубине в эстуарии р. Кеми (Чебанова, 2014)

Влияние градиентов солёности (и плотности) на процессы, происходящие в эстуарии, очень заметно. Горизонтальная сила, вызванная градиентами плотности, прямо пропорциональна горизонтальному градиенту плотности. Если плотность водной массы возрастает с глубиной, но нет горизонтального градиента плотности, то такая водная масса совершенно стабильна. Но это возможно только в состоянии покоя. Тогда распространение солей будет осуществляться за счет молекулярной диффузии. Если же вода движется, то скорость смешения солёной и пресной воды будет зависеть от энергии турбулентности. При малых скоростях потока смешение будет происходить только в узкой зоне раздела между слоями солёной и пресной воды. Может даже наступить почти полное разделение потока на слои пресной и солёной воды. Если равновесие сохраняется и существует постоянный приток пресной воды в эстуарий, содержащий солёную воду, то, согласно закону сохранения вещества, вовлечение солей в верхний слой воды должно вызвать приток солей в нижнем слое, который постепенно убывает в сторону суши. Это сохраняется и при реверсивном движении воды, вызванном приливами. Если турбулентность недостаточно интенсивна для перемешивания слоев, то расходы солей, вызванные эффектом вовлечения, могут складываться с расходами солей, вызванными приливами. Степень смешения может быть любой. Существование горизонтальных градиентов плотности проявляется в возникновении силы, максимальной у дна потока и убывающей в сторону уменьшения плотности воды. Градиенты плотности играют основную роль во всех эстуариях (Мак-Доуэлл, О'Коннор, 1983).

Вертикальное распределение солёности (и плотности) воды является основой для гидрофизической классификации эстуариев. Можно выделить три типа вертикального перемешивания и эстуарной стратификации вод: 1. Полное перемешивание и слабая стратификация; 2. Частичное перемешивание и умеренная стратификация; 3. Слабое перемешивание и сильная стратификация (с клином осолоненных вод) (Хубларян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013).

Параметр стратификации n представляют в виде:

$$n = \Delta S / S_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$, $S_{\text{ср}} = 0,5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$, $S_{\text{дно}}$ и $S_{\text{пов}}$ – солёность воды у дна и на поверхности. При $n < 0,1$ наблюдается полное перемешивание и слабая стратификация, при $n = 0,1-1$ – **частичное перемешивание** и умеренная стратификация, при $n = 1-2$ – слабое перемешивание и сильная стратификация (с клином осолоненных вод) (Михайлов, 1997; Михайлова, 2013; Pritchard, 1967).

На рис. 3 приведено суточное изменение параметра стратификации Притчарда n для р. Кеми, впадающей в Онежский залив Белого моря. Видно, что в фазу малой воды параметр стратификации превышает единицу (Чебанова, 2014). Отсюда можно сделать вывод, что смешение морских и речных вод в эстуарии р. Кеми происходит по типу клина осолоненных вод по классификации Притчарда (Михайлов, 1997; Михайлова, 2013; Pritchard, 1967).

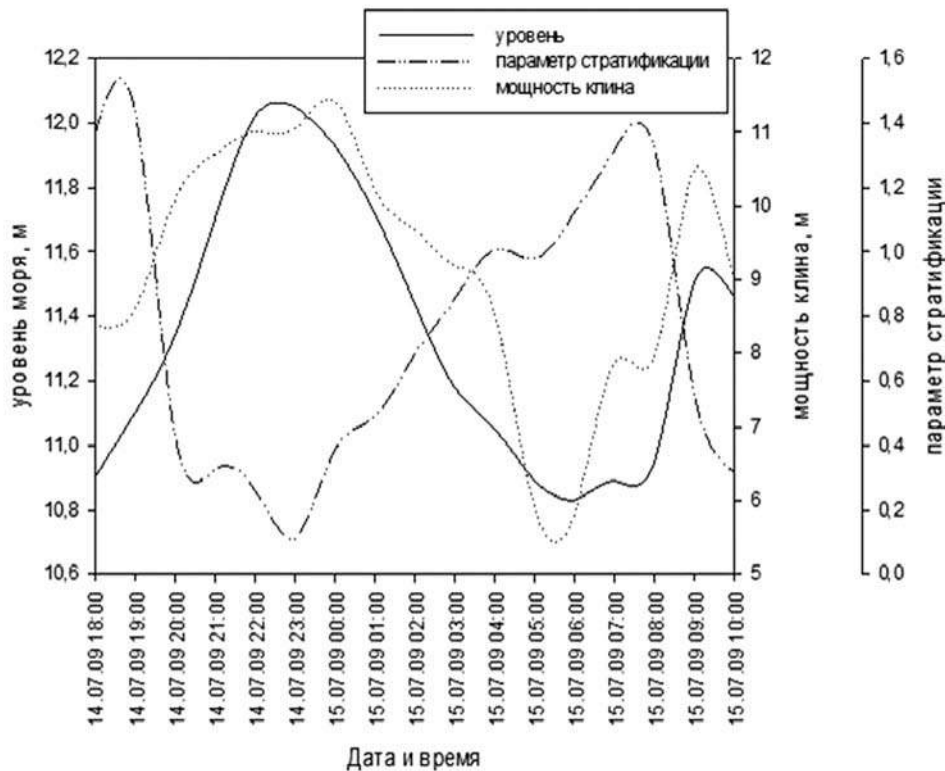


Рис. 3. Суточный ход уровня, параметра стратификации и толщины клина на суточной станции 49 в эстуарии р. Кеми (Чебанова, 2014)

Еще один часто используемый для описания характера перемешивания вод параметр – приливный параметр α , известный также как параметр Симмонса или число Кантера-Кремерса, – характеризует соотношение объемов пресного стока и приливного потока и определяется по формуле (Хубларян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013):

$$\alpha = W / P_t = Q_{\text{ср}} \tau / P_t, \quad (2)$$

где W – объем речного стока за приливный цикл, равный произведению среднего расхода реки за период прилива τ ; P_t – объем приливной призмы. Рост и падение уровня, вызванное приливами, приводят к временному накоплению большого количества морской воды в эстуарии в полную воду и к ее

потере в малую. Общий объем этого обмена водными массами называется приливной призмой. Объем приливной призмы изменяется с изменением амплитуды прилива и обычно определяется по формуле:

$$P_t = \Delta H_{\text{пр.}} F_y,$$

где $\Delta H_{\text{пр.}}$ – средняя величина прилива в эстуарии площадью F_y . Сильно стратифицированному типу соответствует $\alpha > 1$, для слабо стратифицированного эстуария $\alpha = 0,2-0,5$, для хорошо перемешанного типа $\alpha < 0,1$ (Михайлов, 1997; Михайлова, 2013). Геоморфология эстуария сильно влияет на этот параметр (Хубларян, Фролов, 1988).

Для определения типа стратификации и характера перемешивания вод применяются и другие гидрофизические критерии. Одним из таких критериев является плотностное число Фруда. Плотностное число Фруда широко применяется в гидромеханике стратифицированных потоков и определяется по следующей формуле (Михайлов, 1997; Михайлова, 2013):

$$Fr_{\text{пл}} = V / \sqrt{gh\Delta\rho / \rho_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где V – средняя скорость течения речного потока, м/с; g – ускорение силы тяжести; h – глубина потока, м; $\Delta\rho$ – разность плотностей речной и морской воды, г/м³; ρ – средняя плотность морской и речной воды, г/м³.

Исходя из энергетических соображений, Харлеманом и Абрахамом было предложено эстуарное число. Оно характеризует отношение скорости диссипации кинетической энергии к скорости роста потенциальной энергии. Эстуарное число определяется по формуле (Мак-Доуэлл, О’Коннор, 1983; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013):

$$E = Fr^2 / \alpha, \quad (4)$$

где Fr – обычное число Фруда ($Fr = V_0 / \sqrt{gh}$, где V_0 – осредненная по сечению в устьевом створе максимальная скорость течения в прилив), а α – приливный параметр Симмонса (Михайлов, 1997; Михайлова, 2013). Переход от сильно стратифицированного эстуария к хорошо перемешанному осуществляется при E , лежащем в диапазоне от 0,03 до 0,3 (Хубларян, Фролов, 1988).

Помимо приведенных выше критериев, нередко для характеристики устойчивости вод используют число Ричардсона (Михайлов, 1997):

$$Ri = N^2(z) / (\partial v / \partial z)^2, \quad (5)$$

где $N^2(z) = (g / \rho) \partial \rho / \partial z$ – квадрат частоты Ваясяля-Брента, а $\partial v / \partial z$ – изменение скорости с глубиной. Значение числа Ричардсона, равное 0,25, считается критическим, при $Ri > 0,25$ прекращается вертикальное перемешивание (Михайлов, 1997). Существуют и другие гидрофизические критерии, такие как внутреннее эстуарное число, эстуарное число Ричардсона, слоевое число Ричардсона, которые представляют собой различные модификации чисел Фруда и Ричардсона.

Д. В. Хансен и М. Раттрей предложили классификацию эстуариев на основе двухпараметрического приближения, в которой для описания характера стратификации используется параметр стратификации n , равный $\Delta S / S_{\text{ср}}$, а для описания характера вертикальной циркуляции – параметр u_s / u_f , где u_s – средняя поверхностная скорость течения, u_f – средняя скорость всего потока пресной воды, т. е. средняя скорость течения, обусловленная речным стоком (Хубларян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997). С ростом параметра n увеличивается степень стратификации, а с увеличением параметра u_s / u_f – степень влияния прилива. На рис. 4 представлена стратификационно-циркуляционная схема Хансена и Раттрей. Хансен и Раттрей выделили несколько типов эстуариев. В типах эстуариев **1a** и **1b** результирующий поток направлен в сторону моря во всех слоях, хотя тип **1a** – типичный хорошо перемешанный эстуарий со слабой стратификацией, а тип **1b** – уже заметная стратификация; перенос соленых вод вызван действием прилива. Для типов **2a** и **2b** результирующий поток имеет обратное направление на дне, а процессу проникновения солей способствуют как приливная диффузия, так и адвекция; тип **2a** соответствует хорошо перемешанному эстуарию, а тип **2b** – стратифицированному. Тип **3** отличается от типа **2** отсутствием переноса солей в результате приливной диффузии. Тип **3a** имеет слабую стратификацию, а тип **3b** – глубокий нижний слой с градиентами солености, не достигающими дна, характерен для фьордов. Тип **4** характеризует сильно стратифицированный эстуарий с клином соленых вод (Хубларян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997).

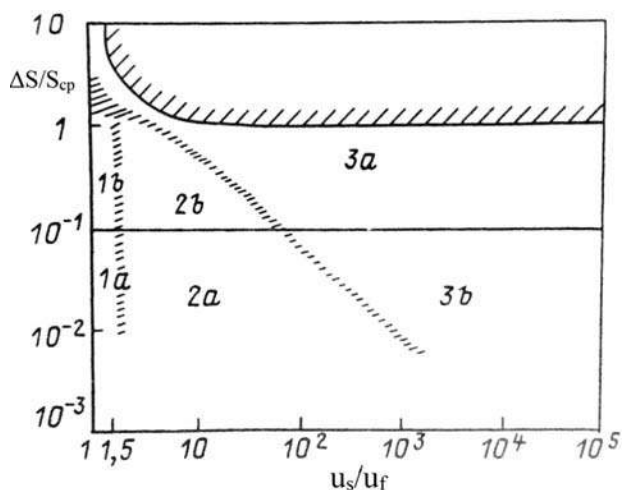


Рис. 4. Стратификационно-циркуляционная схема Хансена и Раттрей (Михайлов, 1997)

оно намного слабее сильного приливного течения (Хубларян, Фролов, 1988; Долгополова, Исупова, 2010; Михайлова, 2013).

В *слабостратифицированных эстуариях* происходит постепенный рост солености от поверхности ко дну с максимальным градиентом в области границы раздела между верхним и нижним слоями. В таких эстуариях сильное приливное течение, за счет которого движение всей водной массы становится турбулентным. В неглубоких эстуариях турбулентность возникает в результате трения о дно. Весь объем воды в эстуарии охвачен турбулентным перемешиванием. Обмен солью и массой между верхним и нижним слоями происходят в обоих направлениях. Соленость вод верхнего и нижнего слоев постепенно растет по направлению к морю при наличии турбулентного обмена между слоями (Хубларян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013).

Если поверхностная соленость значительно меньше придонной, то на средних глубинах наблюдается значительный градиент солености (см. рис. 2). Водные массы по глубине сильно стратифицированы, вертикальные градиенты в слое скачка достигают 15 ‰ (рис. 2). Такие эстуарии называются *сильно стратифицированными (с клином соленых вод)*. Соленость верхнего слоя растет по направлению к морю, тогда как соленость в нижнем слое остается практически неизменной и равна солености в море. В таких эстуариях наблюдается двухслойная циркуляция: в поверхностном слое пресная вода движется в сторону моря, а в придонном слое практически неразбавленная морская вода движется в сторону суши (Хубларян, Фролов, 1988). На рис. 5 приведен ход поверхностной и придонной солености для сильно стратифицированного эстуария р. Кеми. Из рисунка видно, что ход поверхностной солености практически повторяет ход уровня моря, достигая максимального значения в полную воду, минимальное же значение поверхностной солености наступает с опозданием на 1,5 ч (Чебанова, 2014). Морская вода вдоль дна может проникать на большие расстояния в глубь эстуария. Максимальное проникновение соленых вод приходится на момент смены приливного течения на отливное, чему соответствует минимум параметра стратификации (рис. 3). В поверхностном слое отливное течение устанавливается раньше, чем у дна, и в то время, когда в поверхностном слое уже начинается процесс распреснения, в остальной толще воды наблюдается увеличение мощности клина соленых вод (рис. 3).

В результате движения пресной воды в верхнем слое поверх приливного течения в нижнем возникает сильный сдвиг на границе раздела и, как следствие, неустойчивость в виде периодически разрушающихся внутренних волн. При разрушении внутренних волн возникает результирующий перенос массы и соли вверх. Этот процесс известен как вовлечение. Так как вода из нижнего слоя поступает в верхний на протяжении всего эстуария, то граница раздела не выходит на свободную поверхность даже в устье реки (рис. 3, график хода мощности клина) (Чебанова, 2014). Для осуществления процесса вовлечения необходим большой объем нижнего слоя по сравнению с объемом верхнего (Долгополова, Исупова, 2010; Михайлова, 2013).

Хансен и Раттрей показали, что увеличение ширины эстуария приводит к незначительному уменьшению стратификации и большой относительной циркуляции u_s/u_f , увеличение расхода пресной воды – к сильной стратификации и уменьшению параметра u_s/u_f (Хубларян, Фролов, 1988).

В *хорошо перемешанных эстуариях* соленость растет по направлению к морю, но практически не изменяется по глубине из-за интенсивного турбулентного перемешивания. Это вызвано тем, что объем прилива намного больше объема поступающего в эстуарий речного стока. В таких эстуариях перенос соли осуществляется в основном горизонтальной турбулентной диффузией в осредненном течении. Среднее течение на всех горизонтах направлено в сторону моря, но

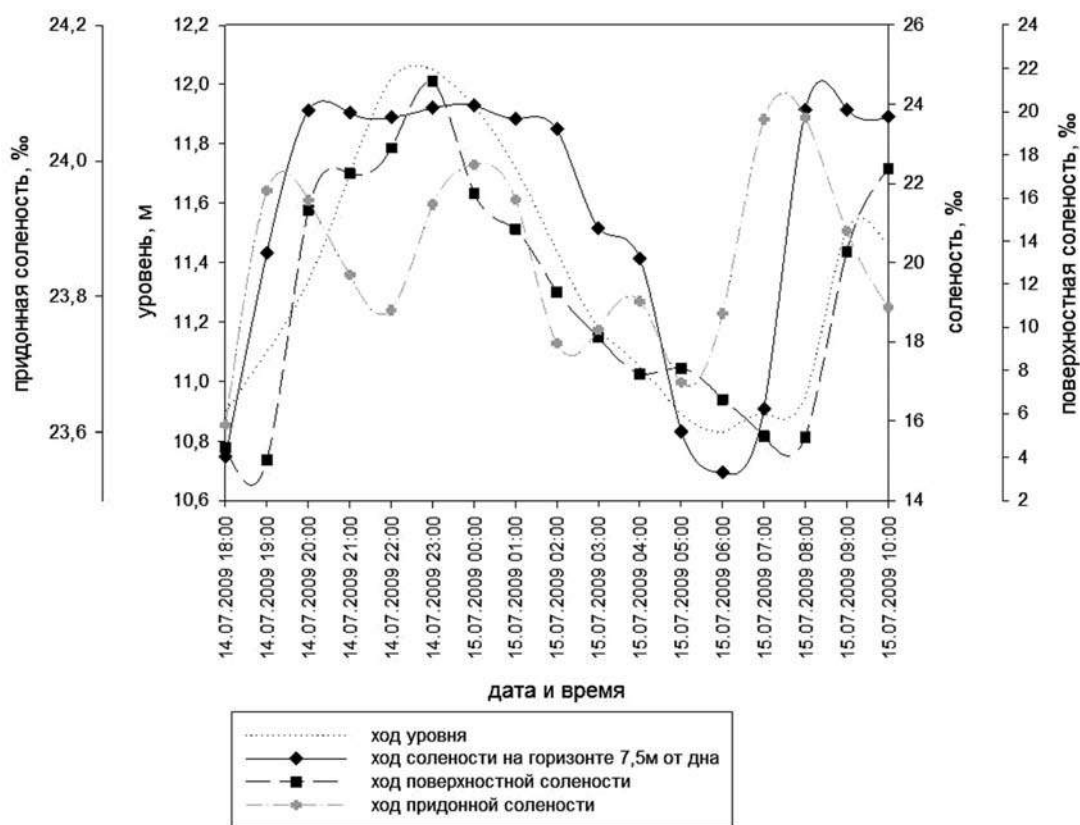


Рис. 5. Суточный ход уровня и солености за приливный цикл (Чебанова, 2014)

Вдоль поверхности соленостного клина формируется слой смешения. В его формировании помимо турбулентного перемешивания большую роль играет процесс вовлечения. В слое смешения за счет образования локальных вихрей из-за сдвига скорости течения (рис. 6) происходит процесс быстрого выравнивания солености и температуры поперек слоя. Как следствие, на вертикальных распределениях солености образуется ступенька (рис. 2). С приливом происходит перемещение клина морских вод и вместе с ним слоя смешения. В результате через точку наблюдения с отливом будут проходить последовательно морская вода, затем вода слоя смешения, затем речная вода, с приливом – все в обратной последовательности. Изменения по времени солености поверхностных вод за приливный цикл имеют вид, приведенный на рис. 5.

Помимо процесса турбулентного перемешивания в слое смешения происходит процесс обрушения за счет потери устойчивости. Об этом свидетельствуют значения числа Ричардсона в слое смешения, которые оказываются меньше критического значения $\frac{1}{4}$ (рис. 7), что указывает на потерю устойчивости течения в слое смешения.

Процессы проникновения морских вод в эстуарии. Интрузия морских вод в эстуарий зависит от величины прилива и характера эстуарной циркуляции вод. Дальность проникновения

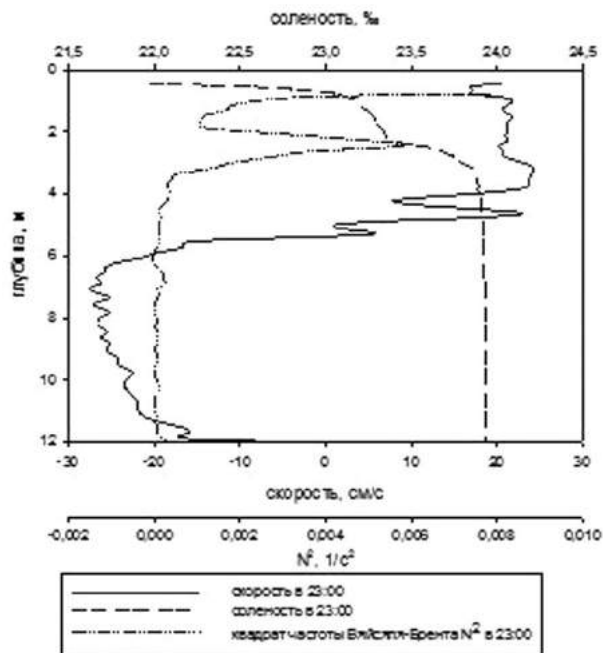


Рис. 6. Распределение скорости, солености и квадрата частоты Вайсяля-Брента по вертикали на суточной станции 49 в 23.00, эстуарий р. Кеми

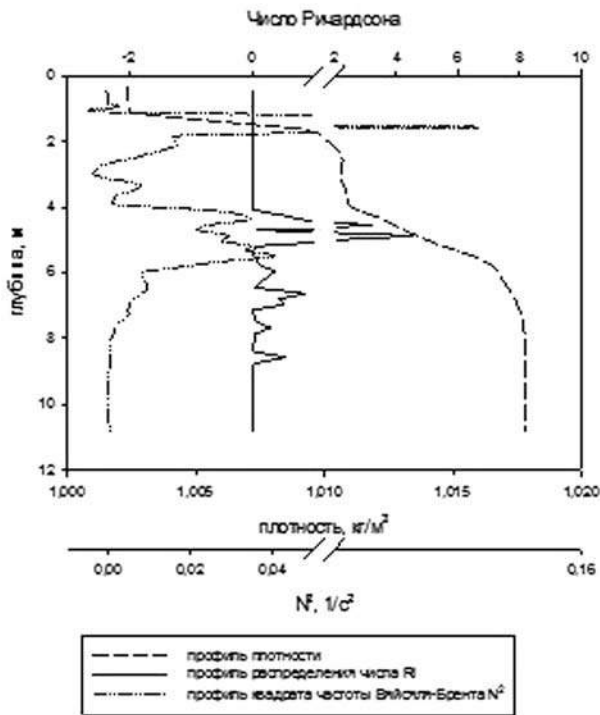


Рис. 7. Распределение условной плотности, квадрата частоты Вайселя-Брента и числа Ричардсона в 18.00 на ст. 49

морских вод в устья рек определяют по-разному в зависимости от стратификации вод и типа вертикального перемешивания. Для случаев полного и частичного перемешивания обычно используют концепцию диффузии-адвекции, которая базируется на упрощенных уравнениях турбулентного стратифицированного течения и переноса соли (Хублярян, Фролов, 1988; Михайлов, 1997; Михайлова, 2013). Основная сложность при ее применении заключается в задании коэффициентов диффузии и турбулентного обмена. Часто для упрощения используют полуэмпирические и эмпирические соотношения. При упрощенном одномерном подходе рассматривается осредненный по сечению поток скоростью v и осредненная соленость воды S . Тогда применяют следующее уравнение (Михайлов, 1997):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (6)$$

где D_x – коэффициент продольной дисперсии, v , S , D_x – осредненные величины для каждого сечения, зависящие от x , t , ось x направлена в сторону реки.

Это уравнение в дальнейшем может быть упрощено для стационарных условий. Решая данное уравнение, можно получить выражения для продольного распределения соли в зоне проникновения и глубины интрузии морских вод в устье реки.

Однако уравнение диффузии-адвекции неприменимо для случаев слабого перемешивания (сильной стратификации) вод (Зырянов, 1995). Для оценки длины клина в условиях слабого перемешивания применяют различные соотношения на основе гидрофизических критериев. Обычно это степенные зависимости от плотностного числа Фруда. По данным, представленным в работе В. Н. Зырянова (1987), наиболее приемлемые результаты дает вязкая теория. Экспериментальные исследования приливных течений на мелководьях показали, что в закритической области глубин имеет место градиентно-вязкий режим течения – в уравнении сохранения импульса баланс осуществляется, главным образом, между горизонтальным градиентом давления и напряжением турбулентного трения.

Градиентно-вязкая теория интрузии морских вод в устья рек дает следующее выражение для формы стационарного клина морских вод (Зырянов, 1987):

$$x = \frac{1}{4R} \left[\frac{1}{2} (q_0^4 - q^4) - (q_0^3 - q^3) + \frac{3}{4} (q_0^2 - q^2) + \frac{1}{4} (q_0 - q) + \frac{3}{8} \ln \frac{3 - 2q_0}{3 - 2q} \right], \quad (7)$$

$$\text{где } q = \eta / H, \quad R = \frac{3AS_R}{4g\delta H^4}.$$

В уравнении (7) $\eta(x, t)$ – толщина слоя морских вод, $H(x)$ – рельеф дна, g – ускорение свободного падения, A – коэффициент вертикального турбулентного обмена, S_R – удельный расход реки (полный поток), $\delta = (\rho_S - \rho_R) / \rho_R$, ρ_S – плотность морской воды, ρ_R – плотность речной воды, $q_0 = q|_{x=0} = D / H$, D – толщина соленостного клина в устьевом створе известна и равна D .

Как видно из формул (7), при расчетах формы клина и дальности проникновения морских вод в устья рек необходимы граничные условия – толщина клина морских вод в какой-нибудь точке зоны смешения речных и морских вод. В качестве такой граничной точки, как правило, выбирают устьевой

створ реки. Само понятие устьевового створа реки далеко не однозначно. Обычно под этим понимают поперечное сечение реки, после которого устье начинает расширяться в сторону моря.

На сегодняшний день существуют только два способа задания толщины соленостного клина в устьевом створе – первый, непосредственно по данным наблюдений, второй – по формуле Кейлега (Зырянов, 1987), полученной им эмпирически по данным лабораторных экспериментов в лотке:

$$\bar{D} = H_0 \left[1 - \left(\frac{v_r}{v_\Delta} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (8)$$

где v_r – средняя скорость речного потока, v_Δ – фазовая скорость гравитационных волн на поверхности раздела соленой и пресной вод (Зырянов, 1987):

$$v_\Delta = \sqrt{gH_0 \frac{\rho_s - \rho_r}{\rho_r}}. \quad (9)$$

Соотношение (8) является эмпирической формулой, полученной по данным экспериментальных измерений в лотке. Использование формулы (8) зачастую приводит к неверным расчетам толщины клина морских вод в устьевых створах рек. Проблема описания динамики взаимодействия речных и морских вод обычно искусственно разделяется на две задачи: первая связана с расчетом зоны интрузии морских вод в устье реки (соленостный клин), вторая – с динамикой растекания речных вод в морской акватории (речные плюмы). Как правило, эти две задачи рассматривают отдельно, и в той и другой задаче задаются условия в устьевом створе реки. На самом деле, эти задачи неразрывно связаны между собой, и на границе их стыковки в устьевом створе должны выполняться условия сопряжения урванной поверхности и толщины слоя морских вод (рис. 8).

Используя эту идею (рис. 8), можно получить уравнение для q_0 в устьевом створе:

$$q_0 (1 - q_0)^3 = P (3 - 2q_0) \quad (10)$$

$$\text{где } P = \frac{3AV_R b_0}{4\delta(2\gamma g H^3 + 3AV_R b_0)}. \quad (11)$$

В уравнении (11) V_R – средняя скорость реки, Q_R – полный расход реки, $h(x)$ – толщина речного потока в плюме, $\gamma = \tan \alpha$, где α – угол бокового растекания, b_0 – ширина реки в устьевом створе, $H(x)$ – рельеф дна (средняя глубина), g – ускорение свободного падения, A – коэффициент вертикального турбулентного обмена, $\delta = (\rho_s - \rho_r) / \rho_r$, ρ_s – плотность морской воды, ρ_r – плотность речной воды.

Параметр P , предложенный выше, может использоваться для характеристики процессов смешения в сильно стратифицированной эстуарии наравне с прочими гидрофизическими параметрами. С помощью параметра P можно аналитически, а не эмпирически определять толщину соленостного клина – характеристику, необходимую для расчета интрузии соленых вод в эстуарий.

Решив уравнение (10) графически и выбрав нужную ветвь корней, можно получить график второй ветви корней уравнения (10) $q_0^{(2)} = f_2(P)$. Таким образом, для того чтобы теперь найти толщину клина морских вод в устьевом створе реки, необходимо вычислить для данной реки параметр P по (11), далее по этому значению P из графика на рис. 9 определить q_0 .

Итак, можем написать формулу для толщины клина в устьевом створе как аналог формулы Кейлега:

$$q_0 = D/H = f_2(P) \quad (12)$$

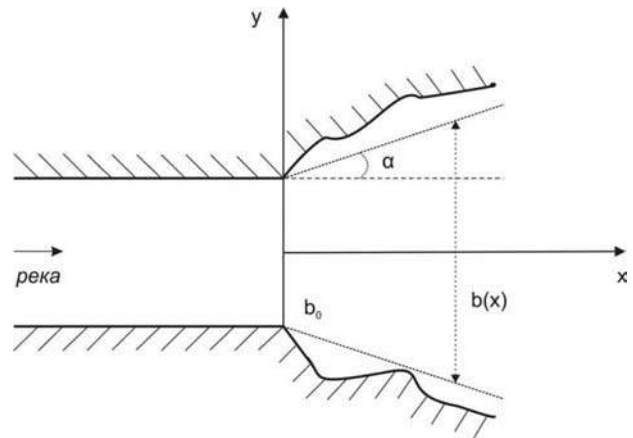


Рис. 8. Схема зоны устьевового створа в плане

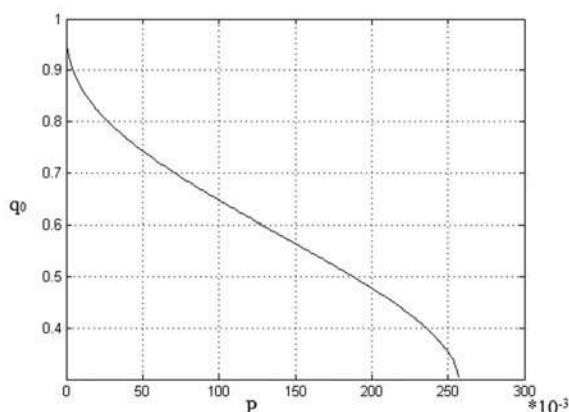


Рис. 9. График корней уравнения (12)

полным выклиниванием морских вод, т. е. нулевым значением толщины нижнего слоя $\eta = 0$. Сравнение реального хода изогалин (рис. 1) и рассчитанной по формуле (7) формы соленостного клина (рис. 10) дает возможность сделать вывод, что использование градиентно-вязкой теории для решения задачи о глубине проникновения соленых вод дает хорошие результаты.

Значения параметров при расчете соленостного клина в устье р. Кеми (Белое море..., 2007)

H_0 , м	ρ_m , кг/м ³	ρ_p , кг/м ³	$\bar{D}$, м	Q , м ³ /с	v_p , м/с	B , м	A_z см ² /с	$\bar{Q}$, м ² /с
3	1,0194	1,000015	2,2	275	0,11	800	10^2	0,3438

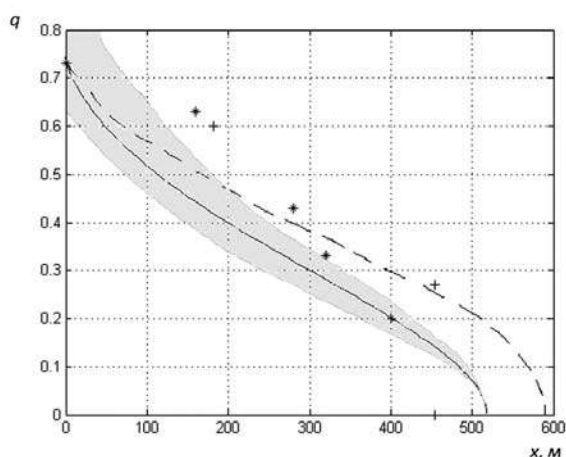


Рис. 10. Теоретическая форма клина по формуле (11). Пунктиром приведено среднее положение клина за приливный цикл с учетом пампинг-эффекта

тельно среднего значения этой характеристики на границе области (Зырянов, 1987). На рис. 10 показано положение соленостного клина в приливном устье Кеми с учетом эффекта приливной накачки (пампинг-эффекта).

Выводы

В работе приведены подходы разных авторов к классификации эстуариев по характеру циркуляции вод и типу вертикального перемешивания, рассмотрены основные факторы, определяющие гидрофизические процессы в эстуариях. Изучение и понимание этих процессов важно для планирования различных видов деятельности в эстуариях. Из-за изменчивости гидрологического режима эстуарии являются своеобразным фильтром на пути загрязненного материкового стока, здесь осаждается значительная часть речных наносов. Загрязнение и осолонение эстуариев становятся зачастую кри-

Оценка угла растекания речного потока в эстуарии Кеми дает значение около 17 градусов. Подставив это значение в формулы (11) и (12), получим $P = 0,054$. Из графика на рис. 9 находим для данного P значение $q_0 = 0,73$. В результате для толщины клина морских вод в устьевом створе с учетом $H = 3$ м получим $D = 2,2$ м.

На рис. 10 представлен результат расчета клина морских вод в устье р. Кеми по формуле (7). Значения параметров р. Кеми, использованные для расчета, представлены в табл. Точками (*, +) показано положение изогалины 6 ‰, снятое с рис. 1 во время прилива и отлива, соответственно. Дальность проникновения морских вод в устье реки определяется

Представленный на рис. 10 соленостный клин рассчитан по теории стационарного клина по осредненным за период прилива характеристикам. Однако в устье р. Кеми соленостный клин является приливным и осредненное за приливный цикл положение клина не одно и то же, что его расчет по осредненным за прилив характеристикам. Осредненное за приливный цикл положение соленостного клина оказывается длиннее стационарного, т. е. стационарный клин дает заниженные значения глубины интрузии морских вод в устья приливных морей. Разница обусловлена нелинейностью процесса, проявлением которой является пампинг-эффект (эффект накачки) (Зырянов, 1987). Для колебательных процессов, описываемых нелинейными уравнениями параболического типа, характерно проявление пампинг-эффекта – эффекта повышения (или понижения) среднего значения описываемой физической характеристики на бесконечности относи-

тическими факторами. Эстуарии используются для сброса бытовых и промышленных сточных вод, при этом оставаясь зоной с высокой биопродуктивностью и рекреационной ценностью. Для эстуариев характерно интересное гидрологическое явление – проникновение соленых вод. В работе на конкретных примерах описан процесс проникновения морских вод в эстуарии и рассмотрены основные теоретические и эмпирические подходы к решению задачи о глубине интрузии соленых вод. Данное явление нередко приводит к попаданию соленых вод в водозаборы, к осолонению поверхностных и подземных вод, воздействию на пресноводную биоту, соленостный клин может стать препятствием на пути перемещения наносов и вызвать заиливание судоходных каналов. Процессы в эстуариях и, в частности, процессы проникновения морских вод недостаточно изучены, поэтому дальнейшее исследование эстуариев очень актуально и в настоящее время.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое эстуарий? Особенности и границы эстуария.
2. Перечислите основные факторы, определяющие гидрологический режим эстуария. Какие классификации эстуариев вам известны?
3. Факторы, определяющие тип стратификации и характер перемешивания вод в эстуарии. Перечислите основные типы стратификации водной толщи в эстуариях и особенности перемешивания вод, характерные для каждого типа.
4. Перечислите основные гидрофизические критерии, используемые для характеристики эстуариев.
5. Опишите процесс проникновения морских вод в эстуарии. Какие основные подходы к решению задачи о глубине интрузии соленых вод вам известны?

Литература

- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.
- Долгополова Е. Н., Исупова М. В. Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 3. С. 274–291.
- Долотов Ю. С. Отчет по гранту РФФИ №09-05-00658-а «Сравнительный анализ особенностей природных процессов на эстуарных, приустьевых и открытых участках разных типов приливных побережий Белого моря» за 2011 г. 39 с.
- Зырянов В. Н. Гидродинамика соленостного клина // Водные ресурсы. 1987. № 6. С. 107–125.
- Зырянов В. Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 240 с.
- Мак-Доуэлл Д. М., О’Коннор Б. А. Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
- Михайлов В. Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: Геос, 1997. 176 с.
- Михайлова М. В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 439–455.
- Хублярян М. Г., Фролов А. П. Моделирование процессов интрузии в эстуариях и подземных водоносных горизонтах. М.: Наука, 1988. 144 с.
- Чебанова М. К. Некоторые особенности интрузии морских вод в приливное устье реки Кемь // Процессы в геосредах: Сб. науч. ст. № 1 (1). М.: ИПМехРАН, 2014. С. 162–169.
- Pritchard D. W. What is an estuary physical view point // Estuaries / Ed. G. H. Lauff. Washington, 1967.

ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А. И. Сидорова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

Отрицательное воздействие человека на биосферу проявляется в разных формах: вырубка леса на больших площадях, истощение запасов пресных подземных вод, засоление и опустынивание земель, резкое сокращение численности, а также исчезновение видов и т. д. Главнейшим и наи-

более распространенным видом негативного воздействия человека на биосферу является загрязнение. Большинство катастрофических ситуаций в мире и, в частности, в России так или иначе связаны с загрязнением окружающей среды (радиоактивное загрязнение после аварии на атомной станции в Чернобыле, кислотные дожди, опасные отходы и т. д.) (Коробкин, Передельский, 2007). В связи с этим цель настоящей работы – дать информацию о видах загрязнения окружающей среды, при этом обратить особое внимание на актуальную проблему последних десятилетий – биологическое загрязнение. Представленные данные могут быть использованы в лекциях учебных курсов по биологическим и экологическим специальностям, в старших классах школ с химико-биологическим профилем для подготовки абитуриентов.

Виды загрязнения окружающей среды

Загрязнением считается привнесение в какую-либо среду новых, не характерных для нее физических, химических и биологических агентов или превышение естественного среднесуточного уровня этих агентов в среде. Загрязняющим агентом может быть любое вещество, находящиеся в составе воздуха, воды, почвы. Вещества, входящие в состав окружающей среды, называют ингредиентами. Ингредиенты могут иметь как природное (например, вулканические извержения, пыльца растений, поднимаемая ветром пыль и т. п.), так и антропогенное (в результате деятельности человеческого общества) происхождение (Страдницкий, Родионов, 1997; Дроздов, 2011).

В настоящее время существует множество классификаций видов загрязнений окружающей среды (Реймерс, 1990; Небел, 1993; Орленок и др., 1998; Максаковский, Петрова, 2010). По пространственному признаку различают глобальное, региональное, локальное (наблюдаемое на небольшой территории) загрязнения. По объектам загрязнения выделяют загрязнение поверхностных и подземных вод, загрязнение атмосферного воздуха, загрязнение почв и т. д. По природе загрязнителей различают следующие виды загрязнения: физическое (шумовое, тепловое, радиоактивное и др.), химическое (загрязнение биосферы пестицидами, тяжелыми металлами, пластмассами, отдельными химическими веществами и элементами) и биологическое (Концепции..., 2008) (рис. 1).



Рис. 1. Виды загрязнений по В. П. Максаковскому, Н. Н. Петровой, 2010 (с изменениями)

Наиболее известный вид загрязнения – *химическое* (поступление в окружающую среду вредных веществ и соединений). Химическими (ингредиентами) загрязнителями являются различные газообразные, жидкие и твердые химические соединения и элементы, попадающие в атмосферу, гидросферу и вступающие во взаимодействие с окружающей средой – кислоты, щелочи, диоксид серы, эмульсии и другие (Степановских, 2001). Количество загрязняющих химических веществ в мире огромно, и число их по мере развития новых технологических процессов постоянно растет. 23 мая 2001 г. в Стокгольме была принята Конвенция по стойким органическим загрязнителям (СОЗ), которая обязывает правительства ликвидировать 12 стойких канцерогенных и токсичных загрязнителей, а

именно: алдрин, гептахлор, ДДТ, диэлдрин, эндрин, хлордан, мирекс, токсафен, гексахлорбензол, полихлорированные бифенелы, диоксины и фураны. Конвенцию подписали около 100 стран мира (Коробкин, Передельский, 2007).

Не меньшую потенциальную угрозу несет второй вид загрязнения – *физическое загрязнение*, т. е. загрязнение, связанное с изменением физических параметров окружающей среды. В зависимости от того, какие именно параметры превышают ПДК, различают следующие виды физического загрязнения: механическое, тепловое, шумовое, световое, электромагнитное, радиоактивное (Максковский, Петрова, 2010). *Механическое* – загрязнение окружающей среды агентами, которые оказывают механическое воздействие (например, захламление мусором разных видов). При отводе воды от систем охлаждения в водные объекты возникает изменение естественного режима температуры в этом объекте, представляющее собой *тепловое загрязнение*. Причем тепловое загрязнение – это не обязательно повышение температуры воды, возможно и ее понижение. Важно именно то, что меняется режим температуры. Известны факты, когда сброс теплых вод создавал тепловой барьер для рыб на их путях к нерестилищам (Страдницкий, Родионов, 1997). Наряду с тепловым (термальным), опасными видами загрязнения являются *световое* – нарушение естественного режима освещенности в том или ином месте в результате воздействия искусственных источников света, приводящее к аномалиям в жизни животных и растений, *шумовое загрязнение* – в результате увеличения интенсивности и повторяемости шума сверх природного уровня. Шум – беспорядочное сочетание различных по силе и частоте звуков. Источниками являются производственное оборудование, транспорт, бытовые приборы, военная техника, общественные места. *Электромагнитное загрязнение* возникает в результате изменения электромагнитных свойств среды. Естественными источниками такого загрязнения являются постоянное электрическое и магнитное поля Земли, радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, звезды), электрические процессы в атмосфере (разряды молний); искусственными источниками – высоковольтные линии электропередач, радиопередач, теле- и радиолокационные станции, электротранспорт (трамвай, троллейбус), трансформаторные подстанции, бытовые электроприборы, компьютер, СВЧ-печи, сотовые и радиотелефоны, спутниковая радиосвязь и т. д., которые приводят к местным и глобальным геофизическим аномалиям и изменениям в тонких биологических структурах (Страдницкий, Родионов, 1997). *Радиоактивное загрязнение* представляет собой превышение естественного уровня содержания радиоактивных веществ в окружающей среде.

Более 50 лет назад ученые обратили внимание на явление проникновения видов живых организмов в новые для них континенты, регионы и экосистемы (Дгебуадзе, 2014). Вселение новых видов в экологические системы – широко распространенный естественный процесс, происходивший во все геологические эпохи существования жизни и особенно интенсивно происходящий в голоцене, который продолжается последние 12 тысяч лет вплоть до современности (Vermeij, 1991). Хозяйственная деятельность человека значительно усиливает масштабы и интенсивность этого природного явления, вызывая в экосистемах массу нежелательных последствий как с точки зрения поддержания их нормальной жизнедеятельности (например, сохранения биологического разнообразия), так и с точки зрения хозяйственной деятельности человека. Под *биологическим загрязнением* понимается проникновение чужеродных видов, которые угрожают биологическому разнообразию и/или численности аборигенных видов и/или стабильности экосистем и/или хозяйственной деятельности человека, а также эксплуатации и охране местных аборигенных растительных или животных ресурсов (Биологические инвазии..., 2004).

К биологическим инвазиям относятся вселения чужеродных видов, произошедшие в результате: естественных перемещений, связанных с флуктуациями численности и климатическими изменениями; интродукции и реинтродукции важных в хозяйственном отношении полезных организмов; с импортной сельскохозяйственной продукцией, багажом, с интродуцентами и т. п. Речные бассейны Европы связаны между собой, в результате чего водные животные способны мигрировать активно или пассивно (например, с балластными водами или прикрепляясь на корпус судов) из одного географического региона в другой. Существуют четыре инвазионных коридора, связывающих южные и северные европейские моря, по которым чужеродные виды способны перемещаться: северный, центральный, южный и восточный (Galil et al., 2007). Северный инвазионный коридор играет важную роль в интродукции чужеродных видов в восточной Европе (рис. 2).

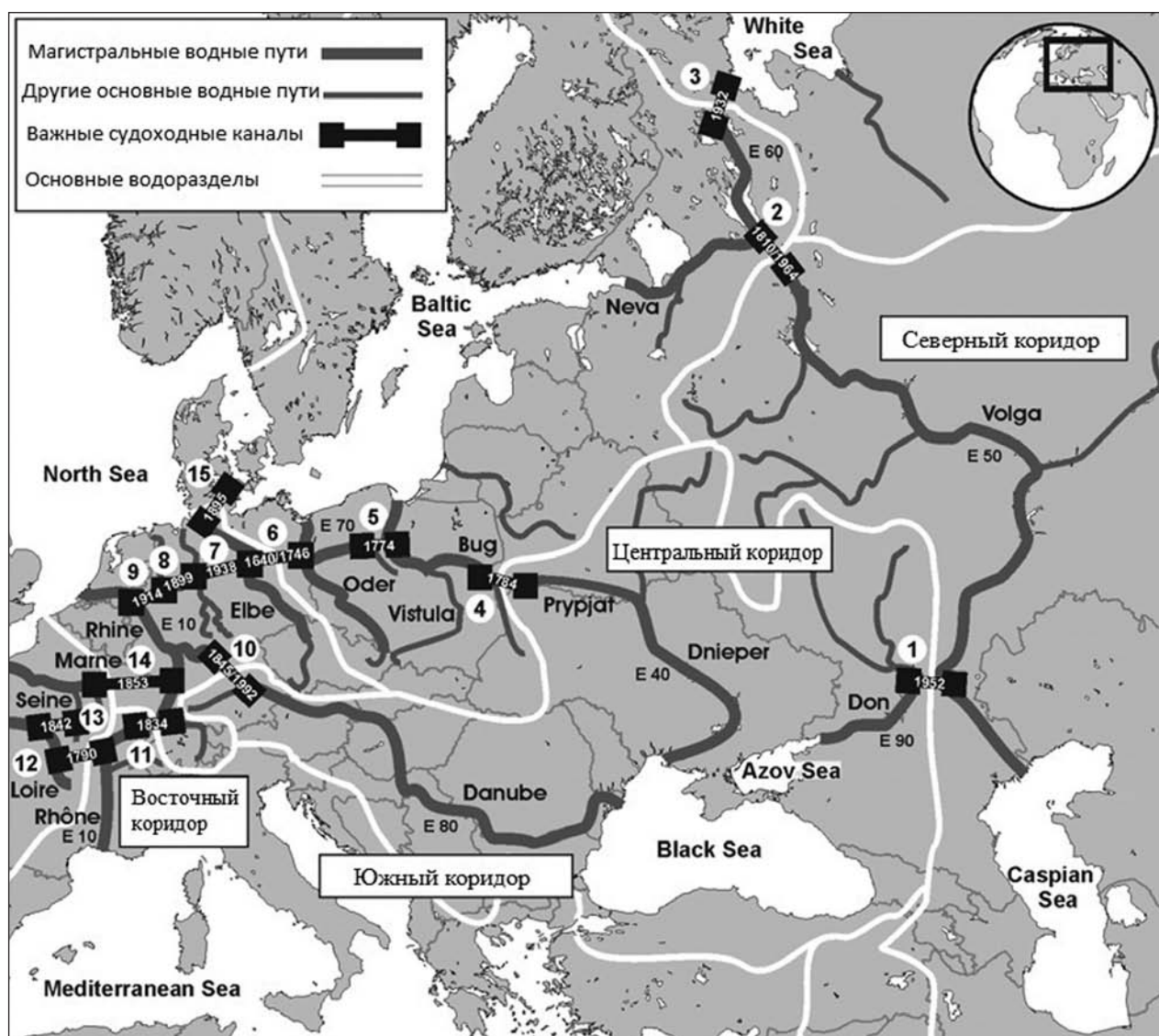


Рис. 2. Важные европейские водные пути и инвазионные коридоры водных видов (Galil et al., 2007)

Для большинства стран число инвазий, зарегистрированных на их территориях, составляет от 100 до 10 000 чужеродных видов (Lodge, 1993), однако многие исследователи считают, что это только надводная часть айсберга и число незарегистрированных вселений гораздо больше. Во многих случаях инвазионные виды, вступая в контакты с популяциями видов-аборигенов, существенно преобразуют структуру биоценозов, и их появление имеет глобальные экологические, экономические, а иногда и социальные последствия. Чтобы убедиться в значимости проблемы на территории России, достаточно привести несколько примеров: колорадский жук, моллюск дрейссена *Dreissena*, гребневик мнемнопсис *Mnemiopsis*, рыба ротан, сорняки рода амброзия, борщевик Сосновского, золотистая картофельная нематода, патогенный для подсолнечника гриб фомопсис *Phomopsis heliantri*. Площадь, занятая колорадским жуком, за 30 последних лет увеличилась более чем в 12 000 раз, достигнув 3 млн га. По данным РАСХН в 1999 г. некоторые области России в результате деятельности жука потеряли до 40 % картофеля. Аллергенный сорняк амброзия полыннолистная распространен в России на 6 млн га и вызывает массовые поллинозы у населения. Инвазия гребневика мнемнопсиса в бассейны Черного, Азовского и Каспийского морей привела к существенному сокращению здесь добычи рыбы. Моллюск дрейссена полиморфа *Dreissena polymorpha* из Каспийского моря через всю европейскую часть России по водным путям проник в Балтийское море, после чего был занесен в Северную Америку. Появление дрейссены всюду сопровождается существенными изменениями водных экосистем. В настоящее время идет инвазия другого вида – бугской дрейссены *D. bugensis*.

Если рассматривать проблему биологических инвазий в плане их влияния на аборигенные виды и их разнообразие, то очевидными представляются следующие формы воздействия чужеродных видов как лимитирующих факторов.

1. Инвазийные виды могут существенно изменить среду обитания аборигенных видов (особенно в случаях, когда инвазийные виды являются «ключевыми видами» сообщества) путем изменения структуры и функции экосистемы.

2. Инвазийные виды могут стать конкурентами аборигенных видов и способствовать их вытеснению.

3. Инвазийные виды могут стать хищниками по отношению к аборигенным видам и также способствовать их вытеснению.

4. Инвазийные виды могут являться переносчиками возбудителей заболеваний аборигенных видов или сами вызывать их заболевания (Дгебуадзе, 2002).

Во всем мире в последние годы наблюдается интенсификация исследований в области биологических инвазий. Разработка мер по их предотвращению, смягчению последствий и мониторингу являются обязанностью всех стран (к ним относится и Россия), подписавших в 1992 г. в Рио-де-Жанейро Конвенцию о биологическом разнообразии (Дгебуадзе, 2002). Однако сократить поток инвазий не удастся из-за целого ряда обстоятельств: низкой эффективности приграничного фито- и зоосанитарного контроля за импортной продукцией; часто скрытого (внутри субстрата) образа жизни инвайдеров; слабой информированности общественности об опасностях, вызываемых несанкционированным заносом чужеродных видов (<http://www.sevin.ru/invasive/>).

В России одним из первых шагов на пути объединения усилий по проблеме инвазий является создание сайта «Чужеродные виды на территории России» с базой данных видов-вселенцев нашей страны (сайт Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН <http://www.sevin.ru/invasive/>). Основные цели создания данного сайта – информирование населения, законодательных органов, научного сообщества и всех заинтересованных организаций о проблемах инвазий чужеродных организмов; координация деятельности различных специалистов и организаций по проблемам инвазий; создание единого информационного пространства по проблеме инвазий чужеродных видов на территории и акватории России.

В водных экосистемах основными причинами увеличения темпов вселения чужеродных видов являются интенсификация судоходства, нерегулируемый сброс балластных вод судами, создание искусственных каналов (инвазионных коридоров) и преднамеренная интродукция.

В пресноводных экосистемах России проблема биологических инвазий ракообразных связана со строительством каналов (инвазионных коридоров) и работами по обогащению водоемов видами байкальского и понто-каспийского происхождения. В 1960–1970-х гг. с целью увеличения кормовой базы рыб проводили преднамеренную интродукцию водных беспозвоночных (Иоффе, 1968; Бекман, 1962). В 1970-х гг. амфипода *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing 1899) из оз. Байкал была перенесена в Горьковское водохранилище на р. Волге (Иванов, 2005) и в озера Карельского перешейка (Нилова, 1976). Впоследствии вид-вселенец успешно акклиматизировался и начал проникать в другие водоемы по системе рек. К 1996 г. рачок заселил всю литоральную зону Ладожского озера (Панов, 1994). Ладожское и Онежское озера входят в состав северного инвазионного коридора (см. рис. 2), который включает маршрут река Волга → озеро Белое → Онежское озеро → Ладожское озеро → река Нева → Балтийское море; вторая ветвь маршрута Онежское озеро → Беломорско-Балтийский канал → Белое море (Panov et al., 2007). В 2001 г. *G. fasciatus* был зарегистрирован вдоль юго-западного берега Онежского озера (Березина, Панов, 2003). Считается, что вселение амфиподы *G. fasciatus* в Онежское озеро могло произойти через р. Свирь из Ладожского озера или из оз. Белого по Волго-Балтийскому каналу (Березина, Панов, 2003). Согласно точке зрения З. С. Кауфмана (2011), инвазионный рачок проник из бассейна Верхней Волги по Волго-Балтийскому каналу. В 2006 г. байкальский вид отмечен практически по всей литорали Онежского озера (Кухарев и др., 2008).

Для изучения жизненного цикла вида-вселенца на литорали Кумса-губы Повенецкого залива Онежского озера был собран гидробиологический материал в период с конца мая по начало октября 2011 г. на трех станциях каждые 10 дней в трех повторностях (рис. 3). Отбор и обработку проб осуществляли в соответствии со стандартными руководствами по сбору пресноводного бентоса (Методические

рекомендации..., 1984, 2005; Панов, Павлов, 1986). Станции были приурочены к глубине 0,4 м, где численность рачка была максимальная. Выбор района наблюдения в Повенецком заливе был обусловлен северной границей ареала инвазионного вида *Gmelinoides fasciatus* в европейской части России.

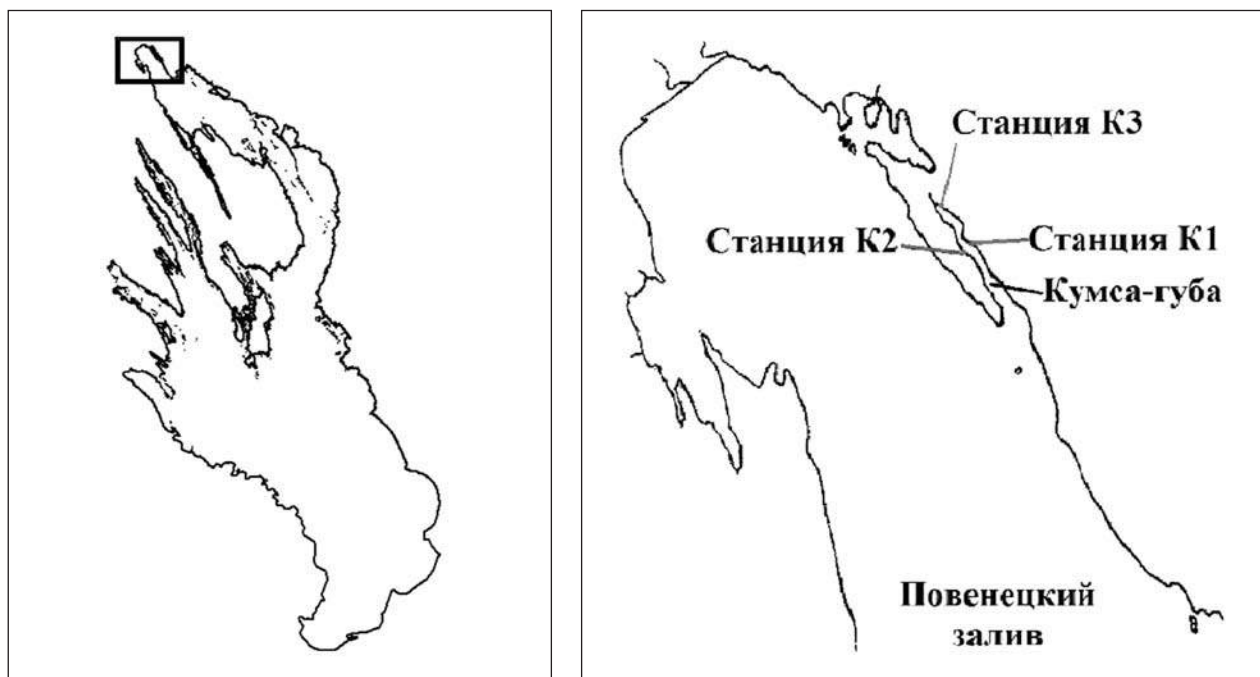


Рис. 3. Схема расположения мониторинговых станций в Кумса-губе Повенецкого залива Онежского озера

По своему поведению инвазионный рачок *Gmelinoides fasciatus* относится к нектобентической форме: часто его можно видеть плавающим у дна или в толще воды, однако способен быстро закапываться в грунт. Среди камней и растений прячется, удерживаясь за них своими цепкими конечностями (Бекман, 1962). Длина тела самцов рачка в условиях водоема-реципиента в Повенецком заливе может достигать 15 мм, самок – 11 мм. В Онежском озере чужеродный вид *G. fasciatus* встречается до глубины 3–4 м, при максимальных популяционных показателях до 1 м (Сидорова, 2013).

Какими же характеристиками определяется способность к успешной инвазии рачка *Gmelinoides fasciatus*? Чужеродные виды амфипод по характеристикам близки к видам-оппортунистам, или г-стратегам, значительно увеличивают свою численность за короткий период времени и могут становиться доминирующими видами в водоеме-реципиенте (Биологические инвазии..., 2004). Так, в условиях Онежского озера байкальский рачок имеет одногодичный жизненный цикл с генерациями предыдущего года и текущего года. На литорали Кумса-губы Повенецкого залива амфипода *G. fasciatus* является массовым видом по численности. Средние показатели численности на мониторинговых станциях в заливе варьировали от 1202 до 2970 экз./м², биомассы – от 1,9 до 5,6 г/м² (Сидорова, 2013).

Половая структура популяции *G. fasciatus* характеризуется стабильностью на всех типах биотопов литорали Онежского озера. За период с конца мая по начало октября в Повенецком заливе преобладающим соотношением полов было 1 : 1. Однако в отдельных случаях в период второго массового вымета молоди в августе отмечалось доминирование самок *G. fasciatus*, их доля достигала 65–85 %. Как известно, преобладание самок в период размножения (образование «гаремов») способствует быстрому нарастанию численности популяции (Биологические инвазии..., 2004). Такие же случаи доминирования самок над самцами были отмечены в зоне зарослей Невской губы (Березина, 2005).

Самки вида *G. fasciatus* имеют высокую плодовитость. Максимальное количество яиц в марсупиуме рачка зарегистрировано в Невской губе Финского залива – 46 яиц/самку (Березина, 2005). Нами отмечено варьирование плодовитости самок от 3 до 22 яиц/самку. Близкие данные были получены другими исследователями. Так, в 2001 г. на юго-западном побережье Онежского озера количество яиц на самку изменялось от 8 до 18 (Березина, Панов, 2003). В целом показатели плодовитости по Онежскому озеру близки к показателям *G. fasciatus* Братского водохранилища, где максимальная плодовитость до-

стигала 26 яиц на самку (Камалтынов, Томилов, 2001). В оз. Байкал максимальная плодовитость самок вида *G. fasciatus* составила 3–32 яиц/самку (Бекман, 1962).

Еще одним характерным признаком г-стратегов является раннее созревание. Так, в северной части Онежского озера (Повенецкий залив) в середине августа 2011 г. отмечены самки (с 7 яйцами) с размером тела 3,5 мм. Согласно ранее проведенным нами исследованиям в Петрозаводской губе Онежского озера в середине августа 2010 г. длина тела яйценосных самок начиналась с 3,2 мм (6 яиц) и была минимальной, в сравнении с аналогичными параметрами рачков в других водоемах. В условиях Невской губы при температуре воды +27 °С (июль 2001 г.) были обнаружены самки *G. fasciatus* с оплодотворенными яйцами (3–4 шт.) при длине тела 3,4 мм. Также в конце лета при высокой температуре воды у самок байкальских бокоплавов в литорали Большого Посольского сора (оз. Байкал) были отмечены раннее развитие и откладка яиц (3–5 шт.) при размерах тела 3,5 мм (Бекман, 1962).

Всеядность вида *G. fasciatus* способствует выживанию и размножению даже в обедненных трофических условиях. Эти амфиподы питаются детритом, наилком, нитчатыми и диатомовыми водорослями, высшими водными растениями и мелкими животными, а также разлагающимся органическим веществом (Бекман, 1962; Биологические инвазии..., 2004; Березина, 2005).

Рачок *G. fasciatus* является эврибионтным видом и в условиях Онежского озера способен жить в разных типах биотопов: песчано-каменистом с зарослями макрофитов, каменистом, илистом с зарослями макрофитов, различных по степени открытости для прибоя (Сидорова, 2013). Оказалось, что именно затишные условия способствуют скоплению рачков, где и наблюдаются максимальные численности. Подобное явление концентрирования рачков на литорали, где имеются укрытия (маленькие бухты, заросли макрофитов, изрезанная береговая линия), отмечалось М. И. Бекман (1962) в оз. Байкал.

Нами было показано, что рачок играет существенную роль в питании окуней на литорали озера (Сидорова, 2013), доминируя по частоте встречаемости. Инвазионная амфипода была обнаружена во всех исследуемых образцах (95 окуней младших возрастных групп). По биомассе доминировали рачки инвазионного вида *G. fasciatus* (28 %), личинки отряда поденки Ephemeroptera (33 %) и отряда ручейники Trichoptera (20 %). По литературным данным, рачком охотно питаются многие рыбы – елец, окунь, сиг, плотва, лещ и др. (Биологические инвазии..., 2004).

Заключение

Интенсивное воздействие человека на природу, негативные, часто необратимые последствия этого воздействия обуславливают необходимость глубокого и всестороннего анализа проблемы взаимодействия общества и природы. За последнее десятилетие накоплен большой материал по изменению природы. Однако он не содержит данных о динамике развития процессов. В связи с этим встал вопрос об организации специальных наблюдений за состоянием окружающей природной среды и ее антропогенными изменениями с целью их оценки, прогнозирования и своевременного предупреждения о возможных неблагоприятных последствиях, т. е. о введении постоянной действующей службы мониторинга. Необходимо обеспечить мониторинг за источниками загрязнения, загрязнением природной среды и последствиями от этого загрязнения, эффективную оценку и прогноз (Афанасьева, Шантарин, 2001).

В настоящее время чужеродные виды считаются второй по значению угрозой биологическому разнообразию после разрушения мест обитания (Биологические инвазии..., 2004). Последствия вселения амфипод, относящихся к видам-биозагрязнителям, слабо изучены и требуют дальнейших оценок. В целом их воздействия на экосистему-реципиент носят необратимый характер и могут приводить к нарушению ее стабильности, снижению видового разнообразия и упрощению сообществ водных организмов (Биологические инвазии..., 2004).

Инвазионный вид *Gmelinoides fasciatus* необратимо изменил экосистему Онежского озера. Высокие численность и биомасса рачка в литоральной зоне указывают на его значительную роль в трофических взаимодействиях, потоках вещества и энергии в биоценозах. Такие характеристики вида, как короткий жизненный цикл и короткое время для производства одной генерации (одногодичный цикл с генерациями предыдущего года и текущего года), преобладание самок в период размножения, высокая плодовитость, раннее созревание, всеядность и эврибионтность, способствуют его успешной инвазии в Онежском озере.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды загрязнений наиболее опасны для водных объектов?
2. Какие химические загрязнители вы знаете?
3. Каковы главные причины расселения видов-вселенцев?
4. Назовите примеры видов-вселенцев.
5. Чем отличаются характеристики видов с r-стратегией и K-стратегией развития популяции?

Литература

- Афанасьева Н. А., Шантарин В. Д. Методические указания по курсу «Экологический мониторинг». Тюмень, 2001. 50 с.
- Дгебуадзе Ю. Ю. Проблемы инвазий чужеродных организмов // Экологическая безопасность и инвазии чужеродных организмов: Сб. материалов Круглого стола Всерос. конф. по экологической безопасности России (4–5 июня 2002 г.). М.: ИПЭЭ им. А. Н. Северцева, 2002. С. 11–14.
- Дгебуадзе Ю. Ю. Чужеродные виды в Голарктике: некоторые результаты и перспективы исследований // Рос. журн. биологических инвазий. 2014. № 1. С. 2–8.
- Бекман М. Ю. Экология и продукция *Micrurupus possolsii* Sow. и *Gmelinoides fasciatus* Stebb. // Тр. Лимнологического ин-та Сибирского отделения АН СССР. 1962. Т. 2, ч. 1. С. 141–155.
- Березина Н. А. Сезонная динамика структуры и плодовитость популяции байкальского бокоплава (*Gmelinoides fasciatus*, Amphipoda, Crustacea) в зарослевой зоне Невской губы // Зоол. журн. 2005. Т. 84, № 4. С. 411–419.
- Березина Н. А., Панов В. Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро // Зоол. журн. 2003. Т. 82, № 6. С. 731–734.
- Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. 436 с.
- Дроздов В. В. Общая экология: Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2011. 412 с.
- Иванов В. К. Структура и взаимодействие в сообществе макробеспозвоночных побережья Рыбинского водохранилища при доминировании *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) // Чужеродные виды в Голарктике (БОРОК-2): Тез. докл. 2-го междунар. симпоз. по изучению инвазийных видов. Борок, Россия, 27 сент. – 10 окт. 2005 г. Рыбинск; Борок, 2005. С. 81–82.
- Иоффе Ц. И. Обзор выполненных работ по акклиматизации кормовых беспозвоночных для рыб в водохранилищах // Изв. ГосНИОРХ. 1968. Т. 67. С. 7–29.
- Калматынов Р. М., Томилов А. А. Динамика популяции *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) (Crustacea, Amphipoda) в Братском водохранилище // Природные ресурсы Забайкалья и проблемы природопользования: Материалы науч. конф. 10–15 сент. 2001 г. Чита, 2001. С. 490–491.
- Кауфман З. С. Некоторые вопросы формирования фауны Онежского и Ладожского озер (краткий обзор) // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 64–76.
- Концепции современного естествознания / Под редакцией Л. А. Михайлова. СПб., 2008. 336 с.
- Коробкин В. И., Передельский Л. В. Экология: Учебник для вузов. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 602 с.
- Кухарев В. И., Полякова Т. Н., Рябинкин А. В. Распространение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежском озере // Зоол. журн. 2008. Т. 87, № 10. С. 1270–1273.
- Максаковский В. П., Петрова Н. Н. Физическая и экономическая география мира. М.: Айрис-пресс, 2010. 368 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при ведении мониторинга биологического загрязнения на Финском заливе / Под ред. А. Ф. Алимова, Т. М. Флоринской. СПб., 2005. 68 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 52 с.
- Небел Б. Наука об окружающей среде: Как устроен мир. М.: Мир, 1993. Т. 1. 424 с.
- Нилова О. И. Некоторые черты экологии и биологии *Gmelinoides fasciatus* Stebb., акклиматизированных в озере Отрадное Ленинградской области // Изв. Гос. науч.-исслед. ин-та озерн. и речн. хоз-ва. 1976. Т. 110. С. 10–15.
- Орленок В. В., Курков А. А., Кучерявый П. П., Тупикин С. Н. Физическая география: Учебное пособие / Под ред. В. В. Орленка. Калининград, 1998. 480 с.
- Панов В. Е. Байкальская эндемичная амфипода *Gmelinoides fasciatus* Stebb. в Ладожском озере // Докл. АН. 1994. Т. 336, № 2. С. 279–282.
- Панов В. Е., Павлов А. М. Методика количественного учета водных беспозвоночных в зарослях камыша и тростника // Гидробиол. журн. 1986. Т. 22, № 6. С. 87–88.

- Реймерс Н. Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- Сидорова А. И. Структурно-функциональные характеристики популяции байкальского вселенца *Gmelinoides fasciatus* Stebbing (Crustacea: Amphipoda) на северной границе ареала (Онежское озеро): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2013. 25 с.
- Степановских А. С. Экология. Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 703 с.
- Страдницкий Г. В., Родионов А. И. Экология: Учебное пособие для вузов. 3-е изд. СПб., 1997. 240 с.
- Galil B. S., Nehring S., Panov V. E. Waterways as invasion highways – Impact of climate change and globalization // Nentwig W: Biological Invasions. Ecological Studies. N 193. Berlin: Springer, 2007. P. 59–74.
- Lodge D. M. Biological invasions: lessons for ecology // Trends Ecol. Evol. 1993. Vol. 8, N 4. P. 133–137.
- Panov V. E., Dgebuadze Y. Y., Shiganova T. A. et al. A risk assessment of biological invasions: inland waterways of Europe – the northern invasion corridor case study // Francesca Gherardi (ed.). Freshwater bioinvaders: profiles, distribution, and threats. Invading Nature – Springer Series in Invasion Ecology. 2007. Vol. 2. P. 639–656.
- Vermeij G. J. When biotas meet: understanding biotic interchange // Science. 1991. Vol. 253, N 5024. P. 1099–1104.
- <http://www.sevin.ru/invasive/>

ФЕНОЛОГИЯ ЗООПЛАНКТОНА ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Ю. Ю. Фомина¹, М. Т. Сярки²

¹ Карельское отделение ФБГНУ «ГосНИОРХ»

² Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Показана необходимость изучения фенологии водных экосистем. Рассматривается важность изучения зоопланктона и прикладное значение изучения его фенологии. В результате исследования доказано существование сезонных фаз для зоопланктона и определены их сроки и продолжительность в Петрозаводской губе Онежского озера. В частности, представлены сроки и продолжительность летнего периода для зоопланктона.

Введение

Фенология (от греч. *phainomena* – явления и *логия*) – система знаний о сезонных явлениях природы, сроках их наступления и причинах, определяющих эти сроки (Биологический энциклопедический словарь, 1986). Знания о сезонных явлениях и сезонном развитии используют для планирования агротехнических мероприятий в сельском и лесном хозяйстве, в садово-парковом деле (например, посев, заготовка семян, посадка растений, рубки ухода, борьба с вредителями и др.), в животноводстве, охотничьем и рыболовном хозяйстве (сроки перегона скота, сроки сезонных миграций и др.). Сбор ягод, грибов, меда, орехов и растительного материала для промышленности и медицины связан с сезонными состояниями. Поэтому фенологию можно считать разделом экологии (Федотова, 2009). Водные экосистемы существенно отличаются от наземных, при их исследовании возникают определенные методические трудности. Явления под водой нельзя наблюдать непосредственно, отмечая их точные даты, по крайней мере, в таком крупном озере, как Онежское. Данные представляют собой моментальные снимки сезонных процессов, можно только предполагать, что происходит в период между съемками. Кроме того, методы отбора и обработки зоопланктона довольно трудоемки.

Зачем нужно изучать фенологию водных экосистем?

Во-первых, не только наземные, но и водные экосистемы северных широт имеют ярко выраженную сезонную цикличность и изменчивость. Изучение функционирования экосистем и их элементов в циклических условиях сезонных изменений вызывает как научный, так и практический интерес. Особенный интерес представляют сезонные циклы зоопланктона, многие организмы которого реагируют на смену времени года образованием покоящихся стадий и другими адаптациями, позволяющими им пережить зимний период. Такие приспособления планктона, связанные с сезонны-

ми циклами, можно рассматривать как преадаптации к антропогенному воздействию (Калинкина, Куликова, 2009). Кроме того, фенология зоопланктона отражает климатические воздействия на водоем. В связи с этим именно сообщества зоопланктона являются наиболее яркими индикаторами изменений в водных экосистемах, находящихся под влиянием природных и антропогенных факторов.

В последнее время широко применяются гидробиологические методы контроля за качеством воды, поэтому изучение зоопланктона как индикатора состояния водных экосистем является актуальным. Состав, общая численность и биомасса, численность и биомасса основных таксономических групп, их соотношение, виды-индикаторы, разнообразие или индекс Шеннона-Уивера и другие показатели зоопланктона используются для биомониторинга. Согласно Рекомендациям Росгидромета (2012) необходимо использовать только летние показатели. Кроме того, летние показатели зоопланктона используют для оценки биоресурсного потенциала озер (Китаев, 2007). Практическое значение фенологии заключается в установлении четких сроков основных явлений в планктоне и фенологических периодов, т. е. сезонов.

Во-вторых, изменения климата вызывают сдвиги сроков тех или иных гидрологических явлений, изменение продолжительности сезонных периодов. Показано, что за последние 60 лет продолжительность «биологического лета» в северных озерах увеличилась на 10–14 суток. Например, в Онежском озере продолжительность безледоставного периода возросла на 12 дней (Филатов и др., 2012). Это вызывает ответную реакцию водных животных, жизненные циклы которых синхронизированы колебаниями факторов среды (Winder, Schindler, 2004). Исследования показали, что численность, биомасса зоопланктона в значительной степени зависят от синоптической ситуации на водоеме в период съемки и в несколько предшествующих суток (George, 2012). Усиление изменчивости климата вызывает появление экстремальных погодных явлений, частых штормов и продолжительных штилей, т. е. изменение интенсивности синоптических факторов.

Цель лекции – раскрыть возможности использования сроков и продолжительности фенологических фаз (сезонов) для зоопланктона (на примере Онежского озера). Излагаемый материал может быть использован учителями и учащимися старших классов общеобразовательных школ с углубленным изучением естественных наук, в подготовке абитуриентов и студентов горно-геологического, агротехнического и эколого-биологического факультетов по дисциплинам: геоэкология, ландшафтная экология, гидрология, лимнология, экология, гидробиология.

Зоопланктон как неотъемлемый элемент Онежского озера

Зоопланктон является одним из важнейших звеньев экосистемы озера. Зоопланктон – совокупность животных, населяющих толщу морских и пресных вод и пассивно переносимых течениями (Биологический энциклопедический словарь, 1986). В зависимости от размеров пресноводный зоопланктон принято делить на: мезопланктон – наиболее крупные организмы, хорошо видимые невооруженным глазом, достигают длины нескольких мм; микропланктон – микроскопические, размером от 50 до 1000 мк; нанопланктон – меньше 50 мк; ультрапланктон – крайне мелкие, менее 20 мк. Количественные показатели зоопланктона варьируют в зависимости от термических и трофических условий в водоеме. Так, в центральном и глубоководном районах озера летняя численность и биомасса зоопланктона достигают 20 тыс. экз./м³ и менее 1 г/м³.

Онежское озеро, одно из Великих озер Европы, является уникальным водным объектом. Экосистема озера на большей части акватории еще сохранила свой естественный статус (Онежское озеро. Атлас, 2010; Тимакова и др., 2011). В настоящее время наблюдаются процессы изменения водных сообществ под влиянием антропогенных и климатических факторов, что делает актуальным более детальное изучение функционирования планктона в годовом цикле. Реакция водных сообществ на влияние факторов может привести к перестройке экосистемы озера и повлиять на ее устойчивость и продуктивность.

Одним из районов, подвергающихся усиленной антропогенной нагрузке, является Петрозаводская губа. Среди всех заливов озера она выделяется высокой проточностью и повышенной антропогенной нагрузкой на акваторию, так как находится под влиянием промышленно-бытовых стоков города и речных вод, обогащенных железом и органическим веществом (Онежское озеро..., 1999). Важность исследования заключается в том, что она служит основным источником питьевого

водоснабжения г. Петрозаводска, зоной рекреации, любительского рыболовства и т. д. Водные сообщества Петрозаводской губы являются предметом внимания биомониторинга Онежского озера.

Онежское озеро имеет экосистему планктонного типа, т. е. основные потоки органического вещества и энергии от продуцентов к высшим трофическим звеньям идут именно через зоопланктон. Кроме того, зоопланктон участвует в процессах саморегуляции экосистемы, образуя множество связей как внутри сообщества, так и с другими элементами экосистемы и факторами среды. Центральное положение зоопланктона в трофической планктонной сети определило его значимость как биоиндикатора состояния всей планктонной системы.

История исследования планктонного сообщества Онежского озера насчитывает более ста лет (Герд, 1946; Николаев, 1972; Филимонова, Куликова, 1984). В прошлом веке большее внимание уделялось изучению зоопланктона как кормового объекта рыб (Урбан, 1968; Куликова и др., 1997; Сярки, 2008). Планктон является основой питания для рыб-планктонофагов, особенно велика его роль в питании молоди рыб (95 % от всех кормовых ресурсов). В настоящее время возрастающий интерес вызывает трансформация зоопланктона под действием антропогенных факторов (Куликова, Сярки, 2004) и биоиндикация изменений, вызванных климатическими колебаниями.

Опубликованные работы свидетельствуют о большом объеме накопленной информации, но, несмотря на это, в настоящее время недостаточно исследована фенология планктона.

Принципы и методы фенологических исследований

В гидробиологии сезонные явления принято называть сезонной динамикой. В современной литературе при описании сезонной динамики планктона основное внимание уделяется изменению состава зоопланктона, его абсолютных показателей и структуры, но явно недостаточно информации о сроках основных явлений в планктоне, длине сезонных фаз и межгодовой изменчивости.

Отсутствие единой схемы проведения многолетних сезонных наблюдений (одноразовые съемки в различное время вегетационного периода) определило недостаточность и нерегулярность данных во временных рядах. Все это обуславливает необходимость поиска новых подходов и методов анализа, в том числе и статистического.

Статистическая обработка данных с помощью методов многомерного анализа позволяет выявить скрытую информацию о сезонах и дать объективные оценки ее достоверности. В частности, применение дискриминантного анализа позволяет выявить сезонные состояния зоопланктона и структурные признаки, по которым их можно идентифицировать (Сярки, 2013). При соблюдении методического единообразия с помощью коэффициентов дискриминационной формулы можно определять сезоны по отдельным данным одноразовых съемок.

Оценка сезонных состояний зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера

Петрозаводская губа – один из крупнейших заливов озера (1,3 % площади), расположен в западной его части. Длина залива составляет 19 км, средняя ширина – 7 км, площадь поверхности – около 125 км², средняя глубина – 18,2 м.

Работа основана на данных Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, полученных в результате комплексных съемок планктона Онежского озера, в том числе и Петрозаводской губы, с 1988 по 2010 г. (Сярки, Куликова, 2012). Для учета зоопланктона была использована количественная сеть Джеди и стандартные методы камеральной обработки проб (Методика..., 2011).

Среднемноголетние траектории сезонной динамики основных групп зоопланктона были получены сглаживанием рядов данных методом скользящего среднего в модификации двойного сглаживания (Сярки, 2013).

Для проведения дискриминантного анализа данные были организованы в матрицу, состоящую из 9 переменных (численности и биомассы четырех основных групп зоопланктона: каланоиды, циклопиды, кладоцеры и коловратки, а также группирующей переменной) и 60 рядов. Сезонные состояния были проанализированы методом дискриминантного анализа, где группирующей величиной был сезон: весенний, раннелетний, позднелетний и осенний. Границы сезонного периода считались по датам самых ранних и поздних данных в сезонной группе. Если точка отстояла от остальной группы более чем на 10 суток, то она считалась отскакивающей и в определении сроков не учитывалась.

Предыдущими исследованиями (Сярки, 2013) было показано, что структура сообщества зоопланктона, или соотношение его основных таксономических групп, изменяется по сезонам (рис. 1).

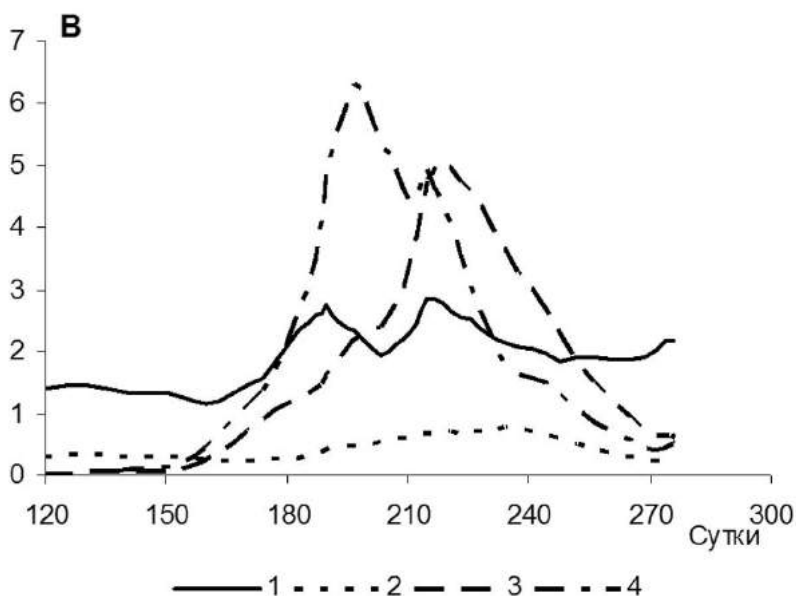


Рис. 1. Среднемноголетняя сезонная динамика биомассы (В, г/м²) зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера.
Скользящие средние (цит. по: Сярки, 2013):
1 — каланоиды, 2 — циклопиды, 3 — кладоцеры, 4 — коловратки

На первом этапе обработки данных группирующая переменная соответствовала месяцу отбора данных, а затем в процессе анализа изменялась в соответствии с вероятностными рекомендациями для достижения максимальной степени дискриминации.

Результаты показали, что существует достоверное разделение состояний зоопланктона между четырьмя сезонами. Степень дискриминации достигает 95 %, причем летние точки были дискриминированы на 100 % (табл.). Только 3 точки из 60 были определены ошибочно, причем пересекались данные за весенний (начало июня) и осенний (сентябрь) период, когда структура зоопланктона была очень похожа (рис. 1).

По критерию хи-квадрат две первые компонентные оси достоверны с высоким уровнем значимости $p < 0,000\,001$. Четыре величины (численность и биомасса циклопидов, а также численность каланоидов и коловраток) были достоверно выделены для дискриминантных функций и определены их коэффициенты.

Классификационная матрица

	Процент правильной классификации	Весна	Раннее лето	Позднее лето	Осень
Весна	89,47	17	0	0	2
Раннее лето	100,00	0	13	0	0
Позднее лето	100,00	0	0	14	0
Осень	92,85	1	0	0	13
Всего	95,00	18	13	14	15

Примечание. Ряды — наблюдаемые величины, столбцы — прогнозируемая классификация.

Определение сезонного состояния по структурным данным показало их хорошее соответствие реальным датам отбора и сезонной динамике количественных величин (рис. 2). Так, данные одной фазы могут сильно различаться по количественным показателям, и наоборот, данные, имеющие сходные показатели, могут различаться по структуре. Это подтверждает информационную важность структуры для оценок состояния зоопланктона и фаз его развития.

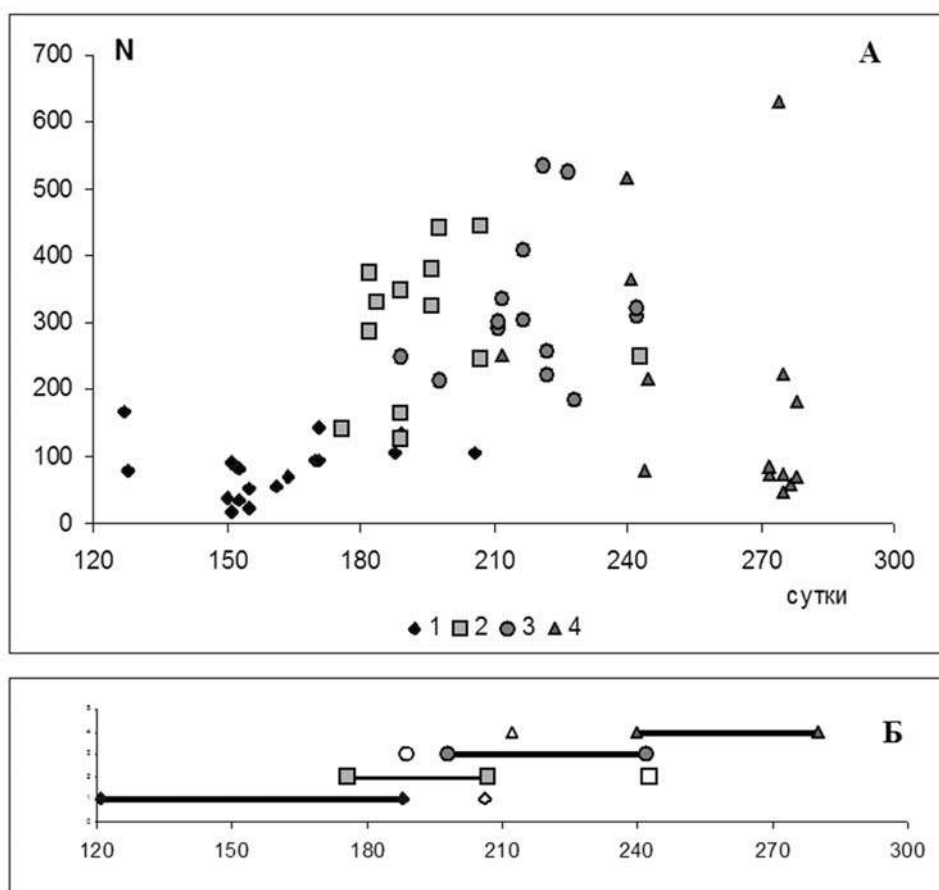


Рис. 2. Сезонная динамика численности (N, тыс. экз./м²) зоопланктона (А) и продолжительность фенологических фаз (Б):

1 – весенний, 2 – раннелетний, 3 – позднелетний, 4 – осенний

Интересным представляется анализ переходных периодов, когда в результате межгодовой изменчивости отмечаются разные сезонные состояния. Например, в июле встречаются пробы, отражающие состояние трех различных фаз: весенней, раннелетней и позднелетней.

Длина переходных периодов, особенно весенне-летнего, связана с величиной межгодовой изменчивости факторов среды. Так, активная гидродинамика Петрозаводской губы в июле вызывает перемешивание водных слоев и приводит к резким колебаниям температуры воды и, соответственно, состояния планктона. Отдельные точки, удаленные от группы более чем на 10 суток, объясняются экстремальными погодными условиями в период отбора проб или за несколько дней до него.

Анализ фенологии планктона показал, что наиболее удобным временем для исследования в рамках биомониторинга является первая половина августа, когда сообщество стабильно пребывает в позднелетнем состоянии и отмечаются максимальные биомассы зоопланктона.

Заключение

В настоящее время фенология водных экосистем мало изучена. Данное исследование заполняет пробелы, связанные с изучением фенологии зоопланктона Онежского озера. Важность исследования зоопланктона, как одного из центральных звеньев планктонной системы озера, определяется не только его значением для кормовой базы рыб, но и индикаторной ролью в системе биомониторинга. Особенно актуальным становится изучение различных сторон жизни зоопланктона в связи с изменением климата и ростом антропогенной нагрузки на водный объект. В настоящей работе статистически доказано существование сезонных фаз для зоопланктона и определены их сроки и продолжительность в Петрозаводской губе. Показано, что летний период для зоопланктона в Петрозаводской губе длится с 25 июня по 30 августа (66 суток).

Прикладное значение фенологических наблюдений водных экосистем заключается в определении сроков летнего периода для зоопланктона в Петрозаводской губе, которые необходимо учитывать при проведении биомониторинга и расчета рыбопродуктивности Онежского озера. Для получения репрезентативных данных в биомониторинге оптимальным периодом для отбора проб зоопланктона является август.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему сезонные состояния зоопланктона не соответствуют календарным сезонам?
2. Совпадают ли сезонные фазы для зоопланктона с сезонами, принятыми в климатологии (связанными с основными гидрологическими явлениями)?
3. Как синоптическая ситуация (погода) влияет на показатели зоопланктона?
4. Почему летний период для зоопланктона в центральной части озера составляет 40 суток, в Петрозаводской губе – 66 суток?
5. Могут ли меняться сроки и продолжительность сезонных фаз для зоопланктона по годам?

Литература

- Биологический энциклопедический словарь / Под ред. М. С. Гилярова. М.: Советская энциклопедия, 1986. 668 с.
- Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Тр. Карело-Фин. отд. ВНИОРХ. 1946. Вып. 11. С. 28–140.
- Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Эволюционная обусловленность реакции гидробионтов на изменение ионного состава воды (на примере пресноводного зоопланктона) // Известия РАН, сер. Биологическая. 2009. № 2. С. 243–248.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.
- Методика комплексного гидрохимического и биологического исследования качества вод и состояния водных и околотовных экосистем: Методическое руководство. Ч. 1: Полевые исследования / Под ред. Т. И. Моисеенко. Тюмень: Тюменский гос. ун-т, 2011. 63 с.
- Николаев Н. Н. Сравнительно-лимнологическая характеристика зоопланктона Онежского озера // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 283–304.
- Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Онежское озеро. Экологические проблемы / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 293 с.
- Рекомендации. Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Ростов н/Д: Росгидромет, ФГБУ ГХИ, 2012. 22 с.
- Сярки М. Т. Оценка рыбопродуктивности по состоянию кормовой базы. Зоопланктон // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 54–67.
- Сярки М. Т. Изучение траектории сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013. № 1 (5). С. 61–67.
- Сярки М. Т., Куликова Т. П. Зоопланктон Онежского озера: база данных. Петрозаводск, 2012. – Рег. номер 2012621150 (9/11/2012); правообладатель Федер. гос. бюджет. учр-ние науки Ин-т водных проблем Севера Карел. науч. центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU).
- Тимакова Т. М., Сабылина А. В., Полякова Т. Н. и др. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 42–49.
- Урбан В. В. Кормовые ресурсы планктона Онежского озера // Тр. Кар. ГосНИОРХа. 1968. Т. 4, вып. 3. С. 106–132.
- Федотова В. Г. Современное состояние отечественной фенологии // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4. С. 166–176.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 80–93.
- Филимонова З. И., Куликова Т. П. О зоопланктоне Петрозаводского Онего // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 123–138.
- George D. G. The effect of nutrient enrichment and changes in the weather on the abundance of *Daphnia* in Esthwaite Water, Cumbria // Freshwater Biology. 2012. Vol. 57, Issue 2. P. 360–372.
- Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes // Global Change Biology. 2004. Vol. 10, Issue 11. P. 1844–1856.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Е. М. Макарова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Рассмотрены пути обмена и важнейшие эколого-трофические группы бактерий как основа индикаторных возможностей бактериального звена в оценке состояния воды. Представлены основные микробиологические показатели состояния природных вод в соответствии с общепринятыми в России классификациями экологического и санитарно-бактериологического состояния воды. На примере малых рек г. Петрозаводска показана возможность оценки состояния воды по микробиологическим показателям на урбанизированной территории Карелии.

Введение

В настоящее время антропогенная нагрузка на гидросферу достигла больших размеров. Проблема сохранения водных ресурсов нашей планеты с каждым годом становится все более острой и относится к одной из наиболее актуальных в науке и практической жизни.

Немаловажное место в деле сохранения качества природных вод занимает биомониторинг водных экосистем. Значимость, а иногда и приоритетность исследования реакции биоты и выработки критериев нормирования отклика водных сообществ на природные и антропогенные изменения четко обозначена в действующих Рекомендациях Росгидромета РФ по оценке состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей (2012).

Одной из важных составляющих биомониторинга водных экосистем является оценка экологического и санитарного качества воды. Немаловажная роль в этом принадлежит бактериальному звену. Индикаторная значимость бактерий и его ведущая роль в *самоочищении воды*, т. е. удалении загрязняющих веществ в результате жизнедеятельности биоты, обусловлена:

1) разнообразием способов функционирования бактерий и, соответственно, наличием в микробиоценозе разных функциональных групп, способных к селективной (облигатной или факультативной) утилизации специфических веществ различного, в том числе и антропогенного, происхождения, недоступных другим организмам;

2) высокой скоростью метаболизма и регенерации, что обеспечивает более быструю, чем у других компонентов биоты, реакцию на незначительные изменения условий среды.

Цель работы – освещение общепринятых в водной микробиологии и гидроэкологии подходов и критериев оценки состояния поверхностных вод по микробиологическим показателям. Материалы могут быть использованы при разработке курсов лекций по гидробиологии и экологии в высших учебных заведениях. Кроме того, предложенный материал может быть использован учителями и учащимися старших классов общеобразовательных школ с углубленным изучением естественных наук, в подготовке абитуриентов химико-биологических специальностей.

Характеристика основных экологических свойств бактериопланктона

Экологические свойства бактерий обеспечивают их широкие индикаторные возможности, повсеместность распространения, важную роль в потоках вещества и энергии в экосистеме и в целом в биогеохимических циклах веществ.

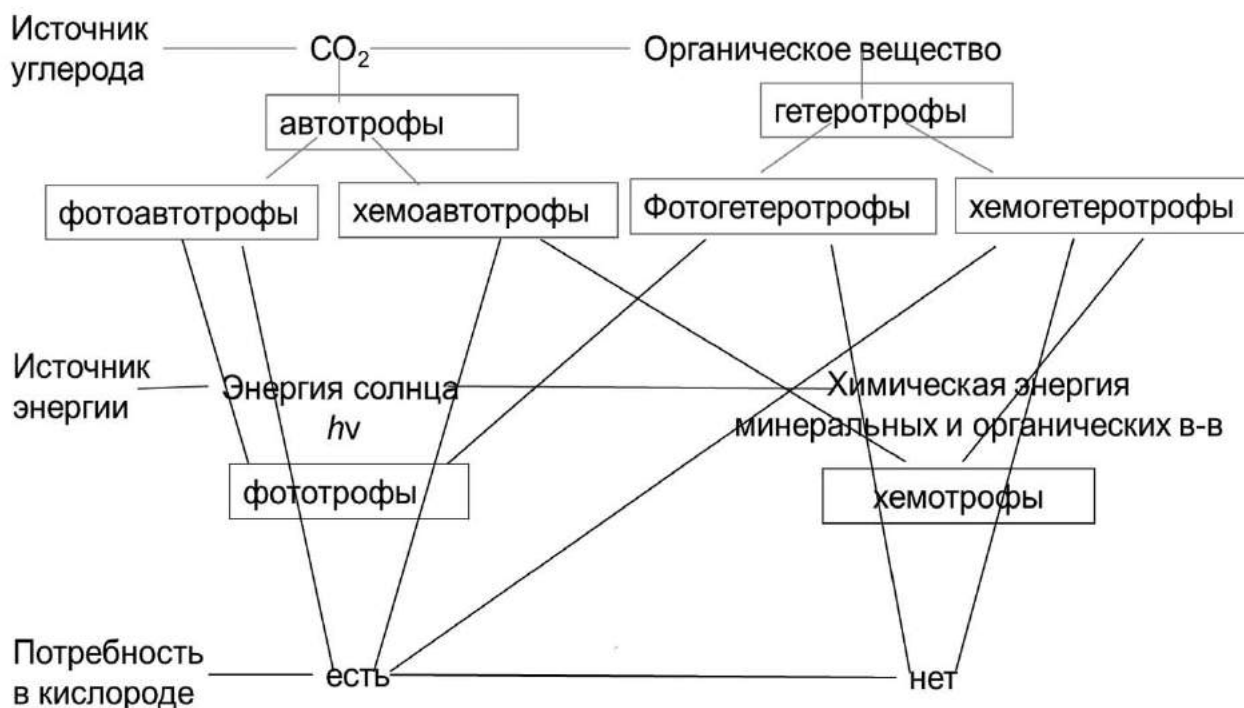
Распространение

Ведущими факторами, регулирующими количественное развитие *бактериопланктона* – бактерий, находящихся в толще воды, являются наличие субстрата и температура, которая в первую очередь зависит от времени года. Количество бактерий в 1 мл поверхностных вод может изменяться от единиц до десятков миллионов. Наибольшие численности, как правило, приурочены к прибрежным зонам. Зимой микрофлора воды в 4–12 раз беднее, чем летом. На глубине 1 км встречаются единич-

ные бактериальные клетки, а на глубине 4 км они практически отсутствуют. Подземные воды (родниковые, артезианские) содержат единичные микробные клетки. Чем ближе к поверхности расположены грунтовые воды, тем обильнее их микрофлора. Так, подземные воды обычных колодцев содержат значительное количество микроорганизмов (Методы..., 2007).

Пути обмена бактерий

Способы функционирования (обмена) бактерий основаны на выборе *источника углерода* – главного компонента биомассы – и *источника энергии* для построения биомассы (рис.).



Способы обмена у бактерий

По отношению к источнику углерода различают две группы: 1) *автотрофные бактерии* – для построения биомассы используют углерод неорганических веществ; 2) *гетеротрофные бактерии* – строят биомассу из углерода органических соединений.

По отношению к источнику энергии бактерии делятся на 1) *фототрофы* – используют энергию солнца; 2) *хемотрофы* – используют химическую энергию окисления минеральных и органических веществ.

Бактериальное дыхание, т. е. высвобождение энергии для протекания клеточных реакций, может быть двух типов: 1) *аэробное* – в присутствии кислорода (окислительное фосфорилирование); 2) *анаэробное* – без участия кислорода (субстратное фосфорилирование).

Комбинация типов питания с использованием разных источников энергии определяет существование четырех основных способов обмена у бактерий: 1) *фотоавтотрофы* – аэробы, для роста используют неорганический углерод и солнечную энергию; 2) *хемоавтотрофы* – аэробы, развиваются на неорганическом углероде, окисляя минеральные вещества; 3) *фотогетеротрофы* – анаэробы, растут, потребляя углерод в составе органических веществ, за счет энергии окисления последних; 4) *хемогетеротрофы* – аэробы и анаэробы, для построения биомассы усваивают углерод органических веществ за счет энергии окисления других органических веществ.

Функциональные группы бактерий

Разнообразие способов обмена позволяет бактериям использовать различные вещества в качестве источника углерода или в качестве источника энергии для поддержания своей биомассы (<http://dic.academic.ru>).

Олигокарбофильные бактерии – гетеротрофные бактерии, способны к росту при минимальных концентрациях органического вещества, завершают процесс его деструкции. Отражают общее количество гетеротрофных бактерий в воде.

Сапрофитные бактерии – большая группа аэробных и факультативно анаэробных гетеротрофных микроорганизмов, развивающихся при высоких концентрациях доступного органического субстрата, активные деструкторы органического вещества. Сапрофиты – индикаторы загрязнения воды биохимически нестойким органическим веществом и активности процесса самоочищения воды.

Аммонифицирующие бактерии (гнилостные бактерии) – гетеротрофные аэробные и факультативно анаэробные бактерии сапрофитной группы, имеющие протеолитические ферменты и способные к минерализации азотсодержащих веществ органических веществ (белков и аминокислот).

Нитрифицирующие бактерии – облигатные хемолитотрофные организмы. Нитрифицирующие бактерии получают энергию, окисляя аммоний до нитратов. Очищают водоем от аммонийных соединений, которые неблагоприятно воздействуют на водные микроорганизмы. В природе их развитие определяется, главным образом, концентрацией аммонийного или нитратного азота, температурой и pH.

Денитрифицирующие бактерии – анаэробные гетеротрофные микроорганизмы, восстанавливающие нитраты до нитритов и далее до молекулярного азота для получения энергии (нитратное дыхание). В результате их деятельности азот возвращается в атмосферу и становится недоступным водным организмам. Денитрифицирующие бактерии способны развиваться и в аэробных условиях, но в этом случае они используют свободный кислород для дыхания и не осуществляют процесса денитрификации.

Азотфиксирующие бактерии – аэробные и анаэробные гетеротрофные микроорганизмы, обладающие способностью усваивать молекулярный азот воздуха и восстанавливать его до аммония, тем самым увеличивая концентрацию связанного азота в водоеме. Промышленный синтез аммиака из азота и водорода составляет не более 5 % фиксированного азота нашей планеты. Поэтому значение биологической азотфиксации для жизни на планете огромно.

Углекислородокисляющие бактерии – гетеротрофные аэробные бактерии, могут использовать углеводороды в качестве единственного источника углерода. Являются индикаторами загрязнения воды нефтяными углеводородами, отражая активность микробиальной трансформации нефтепродуктов.

Фенолрезистентные бактерии – гетеротрофные аэробные бактерии, способные к росту в присутствии токсичных фенольных соединений антропогенного (лакокрасочная, деревообрабатывающая промышленность и др.) и природного (лигнинного) происхождения. Индикаторы наличия в воде фенолов и их производных.

Целлюлозоразрушающие бактерии – группа аэробных и анаэробных гетеротрофных микроорганизмов, разлагающих клетчатку. Численность бактерий данной группы в воде может увеличиваться в осенний период при разложении богатых клетчаткой прибрежной наземной и высшей водной растительности или при сбросе в водный объект сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий.

Железобактерии – гетеротрофные и автотрофные аэробные микроорганизмы, способные окислять соединения железа или марганца для получения энергии и откладывать окислы на поверхности клеток. Окислительная деятельность их приводит к тому, что железо и марганец сравнительно быстро окисляются и концентрируются в донных отложениях.

Сульфатвосстанавливающие (или сульфатредуцирующие) бактерии – гетеротрофные облигатно-анаэробные бактерии, получают энергию восстановлением сульфатов до сульфитов с дальнейшим продуцированием серы в виде сероводорода. Основные производители сероводорода в природе. В анаэробных условиях глубоководных пресных и морских водоемов имеются целые «сероводородные зоны». Появление в пробах воды сульфатредуцирующих бактерий свидетельствует об опасности сероводородного заражения.

Метанобразующие бактерии – облигатно-анаэробные гетеротрофные микроорганизмы, которые способны получать энергию для роста в процессе образования метана из ограниченного на-

бора субстратов, включающих H_2 , CO_2 , формиат, ацетат, метанол и метилированные амины (моно-, ди-, триметиламин и этилдиметиламин).

Оценка состояния воды по показателям бактериопланктона

Классификации экологического состояния поверхностных вод включают оценку класса качества воды, *трофии* – уровня биологической продуктивности, *сапробности* – загрязненности органическим веществом. Для определения этих критериев состояния водного объекта по микробиологическим показателям используют свойство *сапрофитных* бактерий к быстрому росту на питательных средах, богатых биохимически доступным органическим веществом в высоких концентрациях, не свойственных природным водам. Загрязнение воды легкоминерализуемым органическим веществом может вызывать заморные явления, цветение воды, неприятный запах гниения, развитие патогенной микрофлоры, т. е. существенно снижать качество воды. При этом определяют общее количество бактерий и количество сапрофитных бактерий в единице объема воды, а также оценивают их соотношение.

К настоящему времени накоплено множество сведений об общем количестве бактерий и сапрофитов в разнотипных водах. Эти данные позволили выделить пределы их численности в водоемах разного уровня трофии (Горленко и др., 1977; Романенко, 1985), ставшие основой последующих классификаций экологического состояния воды по микробиологическим показателям (табл. 1).

Таблица 1

Пределы численности бактерий в водоемах разного типа

Тип водоема	Сапрофитные бактерии в 1 мл	Общее количество бактерий, млн кл. в 1 мл
Евтрофный	500–2000	2,3–10,0
Мезотрофный	50–200	1,0–2,2
Дистрофный	10–100	0,2–3,8
Олиготрофный	1–10	0,06–1,3

Показатели общего количества и численности сапрофитных бактерий использованы в комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши (Оксиюк и др., 1993; <http://ievbras.ru/ecostat>) (табл. 2).

В. И. Романенко (1985) предложил показатель качества вод, который называется сапробиологической оценкой и представляет долю (%) сапрофитов в общей численности бактериопланктона (табл. 3).

С учетом этих научно обоснованных классификаций микробиологические критерии содержатся в классификации загрязнения воды, предложенной в действующих рекомендациях Росгидромета по оценке состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Классификация включает оценку как степени загрязненности воды (табл. 4), так и сукцессионного состояния экосистемы в результате этого загрязнения (табл. 5). Эти рекомендации используются в системе государственного мониторинга водных объектов России (Руководство..., 1992; Р 52.24.763-2012).

Эти же микробиологические показатели являются составной частью оценки качества воды рыбохозяйственных водоемов в соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77 (<http://vsegost.com>) (табл. 6).

Предложены критерии микробиологической индикации загрязнения поверхностных вод нефтяными углеводородами и фенольными соединениями. На ту или иную степень загрязнения этими веществами могут указывать численности бактерий этих групп более 10^2 – 10^3 кл. в 1 мл воды (Руководство..., 1992). Ввиду того что бактерии, окисляющие углеводороды, являются типичными представителями автохтонной микрофлоры незагрязненных поверхностных вод, возможно, более точную оценку заселенности воды окисляющими нефть бактериями даст не абсолютное их количество, а процентное отношение к количеству сапрофитных бактерий. В незагрязненных водоемах их количество находится в пределах 0,05–5,0 % от числа сапрофитов и бывает выше 100 % в водоемах, загрязненных нефтью (Приемы..., 1960). Фенолрезистентные бактерии также могут быть многочисленны в незагрязненных водах, например, с большим количеством гумусного вещества. Поэтому для оценки загрязненности воды фенолами, скорее всего, также следует оценивать динамику их соотношения с сапрофитными бактериями.

Таблица 2

Оценка экологического состояния воды по микробиологическим показателям

Показатели	Классы качества воды								
	1 – предельно чистая	2 – чистая	3 – удовлетворительной чистоты	4 – загрязненная		5 – грязная			
	Разряды качества вод								
	Предельно чистая	Очень чистая	Вполне чистая	Достаточно чистая	Слабо загрязненная	Умеренно загрязненная	Сильно загрязненная	Весьма грязная	Предельно грязная
Общая численность, млн кл/мл	1	2а	2б	3а	3б	4а	4б	5а	5б
	<0,3	0,3–0,5	0,6–1,5	1,6–2,5	2,6–5,0	5,1–7,0	7,1–10,0	10,1–20,0	>20,0
Численность сапрофитных бактерий, тыс. кл/мл	<0,1	0,1–0,5	0,6–1,0	1,1–3,0	3,1–5,0	5,1–7,0	7,1–10,0	10,1–100,0	>100,0
Зоны сапробности	Ксеносапробная	Олигосапробная		β-мезосапробная		α-мезосапробная		Полисапробная	
Разряды сапробности	Ксеносапробная	β-олиго-сапробная	α-олиго-сапробная	β-мезо-сапробная	β-мезо-сапробная	α-мезо-сапробная	α-мезо-сапробная	β-поли-сапробная	α-поли-сапробная
Категории трофности	Олиготрофная		Мезотрофная		Евтрофная		Политрофная		Гипертрофная
Разряды трофности	Олиготрофная	Олиго-мезотрофная	Мезотрофная	Мезо-евтрофная	Евтрофная	Евполи-трофная	Политрофная	Полигипертрофная	Гипертрофная

Таблица 3

Сапробиологическая оценка качества вод

Сапрофиты / общая численность бактерий, %	Качество воды
<0,003	Особо чистая
0,003–0,03	Чистая
0,03–0,1	Слабозагрязненная
0,1–0,3	Загрязненная
0,3–3,0	Грязная
>3,0	Особо грязная

Таблица 4

Оценка загрязненности воды по микробиологическим показателям

Класс качества воды	Степень загрязненности воды	Общее количество бактерий, 10 ⁶ кл/мл	Количество сапрофитных бактерий, 10 ³ кл/мл	Общее количество бактерий / количество сапрофитных бактерий
1	Очень чистые	Менее 0,5	Менее 0,5	Более 10 ³
2	Чистые	0,5–1,0	0,5–5,0	Более 10 ³
3	Умеренно загрязненные	1,1–3,0	5,1–10,0	10 ³ –10 ²
4	Загрязненные	3,1–5,0	10,1–50,0	Менее 10 ²
5	Грязные	5,1–10,0	50,1–100,0	Менее 10 ²
6	Очень грязные	Более 10,0	Более 100,0	Менее 10 ²

Таблица 5

Оценка состояния экосистемы по шкале экологических модификаций

Состояние экосистемы	Общее количество бактерий, кл/мл (А)	Количество сапрофитных бактерий, 10 ³ кл/мл (Б)	А / Б
Фоновое	<1,0	<0,5	>1000
Экологический прогресс (антропогенное экологическое напряжение)	1,0–4,0	0,5–10,0	1000–400
Элементы экологического регресса	4,0–20,0	10,0–200,0	400–100
Экологический регресс	20,0–40,0	100–70	100–70
Метаболический регресс	>40,0	>700,0	<70

Таблица 6

Микробиологические показатели качества воды водоемов рыбохозяйственного назначения

Показатель	Чистые воды		Загрязненные воды		Грязные воды	
	Сапробность					
	Ксено-сапробность	Олиго-сапробность	Бетамезо-сапробность	Альфамезо-сапробность	Поли-сапробность	Гипер-сапробность
Общее количество бактерий, млн кл/мл	До 0,5	0,5–1,0	1,1–3,0	3,1–5,0	5,1–10,0	Более 10,0
Сапрофиты, тыс. кл/мл	До 0,5	0,5–5,0	5,1–10,0	10,1–50,0	50,1–100,0	Более 100,0
Общее количество бактерий / сапрофиты	Более 10 ²	Более 10 ³	10 ³ –10 ²	Менее 10 ²	Менее 10 ²	Менее 10 ²

Оценка санитарно-бактериологического состояния воды

Важнейшее значение имеет микробиологическая индикация при обнаружении условно патогенных и патогенных микроорганизмов в воде и для оценки эпидемиологической ситуации. Контаминация воды подобными группами бактерий указывает на средней давности фекальное загрязнение и потенциальное наличие в воде бактерий, вызывающих инфекционные кишечные заболевания. Критерии санитарно-бактериологического состояния воды разработаны Минздравом РФ в виде санитарных правил и норм (Гигиенические требования..., 2000) (табл. 7). Подобные исследования обязательно проводятся при выборе нового источника водоснабжения, оценке качества питьевой воды, контроле хозяйственно-бытовых вод, на очистных сооружениях, оценке возможности рекреационного ис-

пользования водного объекта (Унифицированные методы..., 1975). По стандартам СанПиН бактериологический анализ включает определение общих колиформных бактерий, термотолерантных колиформных бактерий, колифагов. Кроме того, в воде обязательно определяется наличие жизнеспособных яиц гельминтов и цист патогенных кишечных простейших, которые не должны содержаться в 25 л воды (Гигиенические требования..., 2000).

Таблица 7

Общие требования к составу и свойствам воды водных объектов в контрольных створах и местах питьевого, хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования (микробиологические показатели)

Показатель	Для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий	Для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест
Термотолерантные колиформные бактерии	Не более 100 КОЕ/100 мл	Не более 100 КОЕ/100 мл
Общие колиформные бактерии	Не более 1000 КОЕ/100 мл	Не более 500 КОЕ/100 мл
Колифаги	Не более 10 БОЕ/100 мл	Не более 10 БОЕ/100 мл

Общие колиформные бактерии – мезофильные (температурный оптимум выше температуры окружающей среды) аэробные и факультативно анаэробные сапрофитные микроорганизмы, относятся к группе кишечной палочки, указывают на средней давности фекальное загрязнение и, соответственно, на возможную обсемененность воды бактериями группы кишечной палочки.

Термотолерантные колиформные бактерии – часть группы общих колиформных бактерий, растут при температуре +40 °С, указывают на свежее фекальное загрязнение и наличие в воде жизнеспособных патогенных бактерий группы кишечной палочки.

Колифаги – вирусы колиформных бактерий, которые заражают бактериальную клетку, размножаются в ней и убивают ее. В большом количестве присутствуют в сточных водах, в свежих фекалиях человека их содержание, как правило, невелико. Служат дополнительными индикаторами качества (степени очистки) воды из-за высокой способности сохранять жизнь вне тела «хозяина».

В ряде случаев для экспресс-анализа эпидемиологической ситуации на водоеме достаточно определить количество общих колиформных бактерий и общее микробное число.

Общее микробное число отражает общее содержание в воде мезофильных (температурный оптимум выше температуры окружающей среды) аэробных и факультативно анаэробных сапрофитных микроорганизмов, растут при температуре +37 °С. Как правило, в незагрязненных поверхностных водах общее микробное число не превышает 1000–1500 кл., в питьевой воде – не более 100 в 1 мл воды.

По соотношению численности сапрофитных бактерий (группа сапрофитов описана выше) и общего микробного числа можно судить о степени завершения процесса самоочищения. Если это соотношение равно 4 и выше, то процесс самоочищения можно считать завершенным. В местах загрязнения вод хозяйственно-бытовыми сточными водами численность обеих групп бактерий имеет сходные значения.

Микробиологическая оценка эколого-санитарного и санитарно-бактериологического состояния воды малых рек Карелии

Иллюстрацией оценки качества природных вод Карелии по микробиологическим показателям могут служить результаты изучения важнейших эколого-трофических групп бактериопланктона в малых реках Лососинке и Неглинке на территории г. Петрозаводска.

Водоемы и водотоки в черте города являются неотделимым элементом городского ландшафта, формируют облик любого населенного пункта, в то же время являются местами рекреационного использования. Загрязнение малых рек и озер на урбанизированных территориях происходит довольно быстро, так как кроме возможных точечных выпусков промышленных сточных вод, наблюдается поступление в воду терригенного городского стока. В результате городские реки перестают нести рекреационную функцию, могут стать источником заболеваний для населения.

Оценка состояния речной воды проводилась в летний период (июнь – август) 2011 и 2012 гг. как в городской черте, так и вне пределов города. Изучалось количественное развитие в воде следующих групп гетеротрофного бактериопланктона, субстратом для которого служит органическое вещество: олигокарбофильной, сапрофитной, фенолрезистентной, углеводородокисляющей, а также бактерий группы кишечной палочки – общепринятыми в водной микробиологии методами (Родина, 1965; Романенко, Кузнецов, 1974; Методические указания..., 1981; Унифицированные методы..., 1985; Кузнецов, Дубинина, 1989; Руководство..., 1992).

В целом из данных эколого-трофических групп наибольшим развитием характеризовались сапрофитные и олигокарбофильные бактерии как наиболее универсальные, т. е. способные потреблять разнокачественное органическое вещество и указывающие на общую загрязненность воды органическим веществом. В р. Неглинке количество бактерий изученных групп было более высоким, что говорит о большей степени ее загрязнения органическим веществом.

Применялись микробиологические критерии оценки трофии, сапробности, качества воды по количеству сапрофитных и олигокарбофильных бактерий (Оксинок и др., 1993; <http://ievbras.ru/ecosta>), загрязненности ее нефтяными углеводородами – по развитию углеводородокисляющих бактерий, фенольными соединениями – по фенолрезистентным бактериям (Руководство..., 1992), чистоты воды для водоемов рыбохозяйственного использования – по сапрофитной микрофлоре (ГОСТ 17.1.2.04-77; <http://vsegost.com>), возможности рекреационного использования – по обсемененности воды бактериями группы кишечной палочки (Гигиенические требования..., 2000).

По качеству воды р. Лососинка в черте города относится к водотокам удовлетворительной чистоты (табл. 8), по классу сапробности является β-мезосапробной, уровень трофии высокий – мезоэвтрофный, загрязнена нефтепродуктами. Качество воды Лососинки вне пределов города (выше по течению) значительно лучше, чем в городской черте.

Состояние воды р. Неглинки хуже по сравнению с р. Лососинкой. Уровень трофии высокий, приустьевой участок речной экосистемы достигает эвтрофно-гипертрофного состояния. По качеству воды Неглинка можно отнести к категории удовлетворительной чистоты – загрязненным водам, по сапробности воды – к классу β-, α-мезосапробных водотоков, количество углеводородокисляющих бактерий указывает на активную биотрансформацию нефтяных углеводородов (табл. 9), т. е. на наличие загрязнения речной воды этими веществами.

Исследование качества воды рек с точки зрения норм для водоемов рыбохозяйственного использования показало, что вода является загрязненной. По санитарно-бактериологическому состоянию реки г. Петрозаводска относятся к категории грязные (табл. 10). Количество условно патогенной микрофлоры значительно превышает пределы, установленные Минздравом России, что свидетельствует о наличии в воде фекального загрязнения. Рекреационное использование рек Лососинки и Неглинки в городской черте в период исследований было невозможно.

Таблица 8

Эколого-санитарное состояние воды рек г. Петрозаводска по микробиологическим показателям

Река	Участок	Олигокарбофилы, тыс. КОЕ/мл	Сапрофиты, тыс. КОЕ/мл	Класс качества воды	Сапробность	Класс трофии	Чистота воды для водоемов рыбохозяйственного назначения
Лососинка	Вне пределов города	<u>0,69–6,14</u> 2,61	<u>0,53–3,80</u> 0,89	2 чистая	Олигосапробная / β-мезосапробная	Олиго-мезотрофная / мезотрофная	Чистая
	Городской	<u>2,84–16,58</u> 6,58	<u>1,02–12,95</u> 3,25	3 удовлетворительной чистоты	β-мезосапробная	Мезоэвтрофная	Чистая
Неглинка	Городской	<u>2,20–23,83</u> 10,50	<u>1,97–15,75</u> 5,39	3–4 удовлетворительной чистоты – загрязненная	β-, α-мезосапробная	Мезоэвтрофная / эвтрофногипертрофная	Чистая – загрязненная

Таблица 9

**Индикация загрязненности воды рек г. Петрозаводска нефтепродуктами
по микробиологическим показателям**

Река	Участок	Количество углеводородокисляющих бактерий, КОЕ/мл	Загрязненность нефтепродуктами
Лососинка	Вне пределов города	$\frac{0,05-0,63}{0,19}$	Нет
	Городской	$\frac{0,14-1,29}{0,55}$	Есть
Неглинка	Городской	$\frac{0,16-1,76}{0,80}$	Есть

Таблица 10

Санитарно-бактериологическое состояние воды рек г. Петрозаводска

Река	Участок	Бактерии группы кишечной палочки, Coli-ind	Состояние	Возможность рекреационного использования
Лососинка	Вне пределов города	$\frac{1451-4290}{3237}$	Благополучное	Да
	Городской	$\frac{4098-188\ 288}{77461}$	Неблагополучное	Нет
Неглинка	Городской	$\frac{165\ 545-440\ 000}{247380}$	Неблагополучное	Нет

Заключение

Водная микробиология располагает разнообразными способами и подходами к определению санитарно-микробиологического состояния воды: во-первых, с точки зрения выделения патогенных для человека микроорганизмов, во-вторых, для выработки критериев нормирования загрязнения поверхностных вод. Важнейшим направлением водной микробиологии является изучение закономерностей развития и распространения различных экологических групп бактерий. Это объясняется эволюционно обусловленной важнейшей ролью микроорганизмов в биогеохимических циклах элементов в природе. Без исследования участия бактериального звена в круговороте веществ в водных экосистемах невозможно составить полное представление о ее функционировании и направлении развития.

Глобальная роль бактерий в круговороте углерода и органического вещества в водных экосистемах стала фундаментальной основой для разработки различных классификаций и норм для оценки качества поверхностных природных вод и самоочистительной способности водоема по микробиологическим показателям – индикаторам органического загрязнения. При этом главное значение при нормировании имеет целевой подход к использованию водоема (для питьевого, хозяйственно-бытового, рыбохозяйственного назначения). Наиболее жесткие требования предъявляются при оценке качества воды для питьевых нужд, так как с качеством потребляемой воды напрямую связано здоровье человека. Стандартными индикаторными группами при этом являются сапрофитные бактерии, олигокарбофильные бактерии, бактерии группы кишечной палочки, а также общая концентрация бактерий в воде.

При оценке состояния воды объектов, находящихся в условиях специфического загрязнения, наиболее информативными индикаторами являются функциональные группы бактерий, осуществляющих разрушение конкретных веществ (клетчатки, нефтепродуктов, фенолов, метана, парафинов и т. д.).

Методами водной микробиологии была выполнена оценка состояния двух рек – Неглинка и Лососинка, протекающих по территории г. Петрозаводска. Исследования показали, что в водной среде происходит трансформация органических веществ, в том числе нефтепродуктов. Следовательно, в реках протекают процессы самоочищения. Тем не менее тревогу вызывает санитарно-бактериологическое состояние городских рек, в воде которых было обнаружено большое количество условно патогенной микрофлоры. Этот факт позволяет отнести реки г. Петрозаводска к категории грязных, непригодных для купания.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие типы обмена микроорганизмов вы знаете?
2. Какова роль микроорганизмов в формировании состава природных вод?
3. Назовите основные физиологические группы микроорганизмов.
4. Какие показатели бактериопланктона используются в эколого-санитарных классификациях?
5. Какие группы микроорганизмов по отношению к температуре существуют?

Литература

- Гигиенические требования к охране поверхностных вод: Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.1.5.980-00). М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000.
- Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С. И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с.
- ГОСТ 17.1.2.04-77 Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов.
- Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
- Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу воды поверхностных водоемов. Утвер. Главным санитарным эпидемиологическим управлением МЗ СССР 19 января 1981 № 2585-81. Минздрав СССР. М., 1981. 36 с.
- Методы микроэкологического исследования наземных, водных и воздушных экосистем: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Биология» / С. В. Прудникова и др. Красноярск: СФУ, 2007. 152 с.
- Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П. и др. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
- Приемы санитарного изучения водоемов / Ред. С. М. Драчева. М., 1960. 356 с.
- Р 52.24.763-2012. Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Ростов н/Д, 2012. 22 с.
- Родина А. Г. Методы водной микробиологии. Практическое руководство. М.: Наука, 1965. 364 с.
- Романенко В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. М.: Наука, 1985. 296 с.
- Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Лабораторное руководство. Л.: Наука, 1974. 196 с.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ред. В. А. Абакумов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
- Унифицированные методы исследования качества вод. Микробиологические методы. Ч. 2. М.: Секретариат СЭВ, 1985. 128 с.
- Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 4. Методы биологического анализа вод. М.: Секретариат СЭВ, 1975. 140 с.
- <http://ievbras.ru/ecostat/Kiril/Library/Book1/Content236/Tables.htm>
- <http://vsegost.com/Catalog/33/33538.shtml>
- <http://dic.academic.ru>

АВТОХТОННОЕ И АЛЛОХТОННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТАХ КАРЕЛИИ

М. В. Зобкова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

Статья дает представление об органическом веществе природных вод и его составляющих и содержит новейшие исследования в этой области. Лекция предназначена для расширения кругозора школьников старших классов средней школы, абитуриентов и студентов вузов и может быть использована в курсе органической химии и химии окружающей среды.

Изложение материала

Органическое вещество (ОВ) – многокомпонентная смесь органических соединений, являющаяся неотъемлемым компонентом атмосферы, поверхностных и подземных вод, почв, осадочных горных пород. ОВ природных вод играет важную роль во всех объектах гидросферы. Оно является источником питания для многих водных организмов, активно участвует в миграции некоторых элементов и во многом определяет качество воды. ОВ природных вод подвержено циклической трансформации: бактериальной деструкции, химической деградации, седиментации и новообразованию.

Для количественной оценки органического вещества в воде применяют косвенные характеристики его содержания: химическое потребление кислорода (ХПК), перманганатную окисляемость (ПО), концентрацию общего органического углерода. По цветности воды судят о наличии окрашенных органических веществ. Методики определения ХПК и ПО основаны на анализе количества кислорода, расходуемого на окисление содержащихся в воде органических и неорганических веществ сильными окислителями (в случае ХПК – дихромат калия, а ПО – перманганат калия) при нагревании в кислой среде (РД 52.24.421-2012).

Общий органический углерод ($C_{орг}$) является одним из важнейших показателей содержания органического вещества в воде. В настоящее время существует несколько способов его определения, которые основаны на принципиально различных подходах. Прежде всего они отличаются по способу разложения ОВ: сжигание в высокотемпературной печи при температуре 600–1000 °С (Spyres et al., 2000), **обработка окислителями либо фотохимическое разложение ультрафиолетовым излучением** (Urbansky, 2001). Независимо от способа разложения **регистрация результата** может также выполняться различными методами. Наиболее широко распространенным является регистрация объема углекислого газа, выделяющегося при окислении ОВ, несколько реже используются кондуктометрическое определение и спектрофотометрическое определение при длине волны 254 нм (ЕРА/600/R-09/122), а также прямое определение в УФ диапазоне (230–300 нм) с помощью специальных сенсоров in situ (Sandford et al., 2010). Существуют методики определения органического углерода в запаянных колбах, а также основанные на флуоресценции (Stedmon, Markager, 2005). Первая в настоящее время считается устаревшей, вторая находится в стадии разработки и в промышленных приборах пока не используется.

Все перечисленные способы оценки ОВ природных вод дают общее представление о его содержании, но они не позволяют судить о составных частях ОВ. В зависимости от источника происхождения ОВ природных вод делится на две группы: автохтонное и аллохтонное ОВ. Первое образуется в самом водоеме в результате протекания продукционно-деструкционных процессов и представлено биохимически легкоокисляемыми продуктами (углеводы, липиды, белки, мочевины, летучие органические кислоты и др.). Второе обусловлено веществами гумусовой природы (фульвовые и гуминовые кислоты, гумин) и веществами сточных вод, поступающими в водоемы с водосборной территории.

Существует несколько отличительных признаков автохтонного и аллохтонного ОВ:

- 1) по соотношению перманганатной окисляемости (ПО) и химического потребления кислорода (ХПК) (для автохтонного ОВ они меньше, чем для аллохтонного);
- 2) по отношению $C_{орг} : N_{орг}$ (для автохтонного ОВ они меньше, чем для аллохтонного);
- 3) по способности к биохимическому окислению (автохтонное ОВ – легкоокисляемое, а аллохтонное – трудноокисляемое);

4) по интенсивности светопоглощения в видимой и УФ области спектра. Еще Б. А. Скопинцев говорил, что «аллохтонное ОВ – это темный гумус, автохтонное ОВ – светлый гумус» (Скопинцев, 1950).

Несмотря на имеющиеся отличия автохтонного и аллохтонного ОВ, до сих пор отсутствуют надежные количественные методы определения их содержания в воде. Это связано с тем, что ОВ природных вод является сложной многокомпонентной смесью веществ и постоянно преобразуется в ходе различных внутриводоемных процессов, в результате чего меняются и его характеристики. С учетом особенностей светопоглощения автохтонного и аллохтонного ОВ, которое отражается на цветности воды, а также различий в степени их окисления перманганатом калия, путем математического моделирования с использованием многочисленных данных по водным объектам гумидной зоны получено эмпирическое уравнение связи доли автохтонного ОВ с ХПК, цветностью и перманганатной окисля-

емостью воды (Лозовик и др., 2007): $\rho_{\text{авт}} = 0,62\text{ХПК}/\text{Hum} - 0,35$, где $\text{Hum} = \sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}}$. Последний показатель называется гумусностью воды, и он является одним из основных компонентов классификации поверхностных вод гумидной зоны (Лозовик, 2006).

Принимая во внимание, что природное аллохтонное ОВ представлено большей частью гумусовыми веществами и для выделения последних из воды широко используется адсорбция на диэтил-аминоэтилцеллюлозе (ДЭАЭ-целлюлозе) (Варшал и др., 1973), мы разработали методику разделения ОВ природных вод на аллохтонную и автохтонную составляющие адсорбцией на ДЭАЭ-целлюлозе в динамическом режиме (Лозовик, Мусатова, 2013). Этот метод адсорбции заключается в последовательном добавлении порций водной суспензии адсорбента к пробе воды и пропускании полученного раствора через фильтр Шотта.

С использованием новой методики было проведено исследование содержания автохтонного и аллохтонного ОВ в разнотипных озерах Карелии в течение четырех гидрологических сезонов 2012–2013 гг. В качестве объектов исследования в 2012 г. было выбрано 9 озер (Салонъярви, Вегарусъярви, Крошнозеро, Святозеро, Вендюрское, Урос, Урозеро, Валгомозеро, Яндомозеро), отличающихся по гидрологическим, гидрохимическим показателям и по уровню трофии. В 2013 г. исследования продолжились на Онежском озере (Петрозаводская и Кондопожская губы, центр озера и устье реки Шуи), а также на озерах Шотозеро, Сямозеро и Каменное (губа Камалахта, центр озера). В 2014 г. исследования проводились в период открытой воды в фотическом и придонном слоях таких крупных озер, как Онежское и Ладожское, а также на р. Неве.

Наряду с оценкой доли автохтонного ОВ по адсорбции, осуществлялся ее расчет по эмпирической формуле $\rho_{\text{авт}} = 0,62\text{ХПК}/\sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}} - 0,35$. Зависимость $\rho_{\text{алл}}$ по адсорбции от рассчитанной по эмпирической формуле показана на рис. 1, на котором наблюдается тесная положительная связь между переменными. Важно подчеркнуть, что значения доли аллохтонного ОВ, полученные по адсорбции, оказываются близки к данным, рассчитанным по эмпирической формуле.

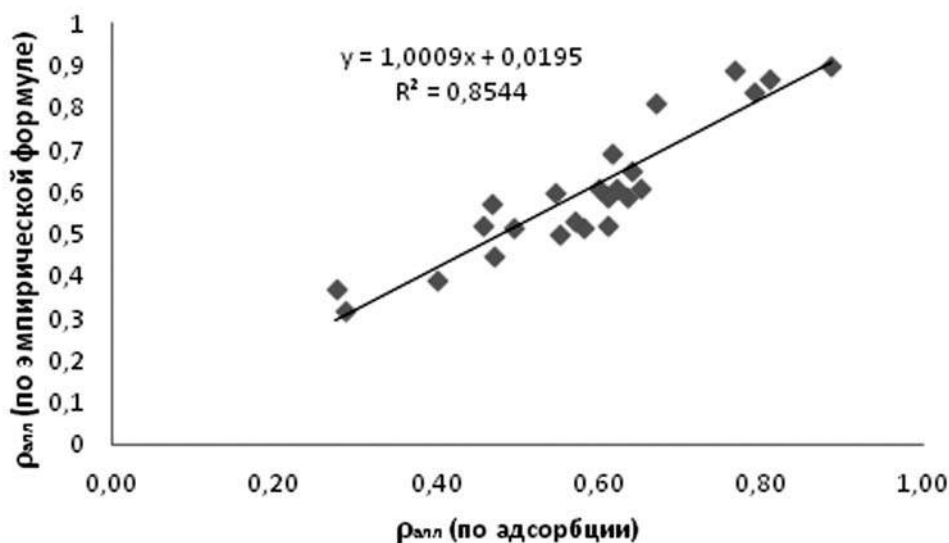


Рис. 1. Зависимость доли аллохтонного ОВ, рассчитанной по эмпирической формуле и по адсорбции

Если проанализировать средние величины ХПК растворенного автохтонного ОВ в исследованных водных объектах, то можно отметить, что величины $(\text{ХПК}_{\text{авт./раств}})$ для всех водоемов имеют близкие значения (рис. 2). Наименьшие значения наблюдаются в олиготрофных озерах (Урос, Урозеро, Вендюрское и Каменное), а также в центральном плесе Онежского озера. Средняя величина $(\text{ХПК}_{\text{авт./раств}})$ воды для всех исследованных водных объектов за все гидрологические сезоны 2012–2013 гг. составляет 8,2 мг О/л, что в пересчете на углерод ($\text{C}_{\text{орг}} = 0,375\text{ХПК}$) соответствует $3,1 \pm 0,8$ мг С/л, что почти в 2 раза выше, чем в морских водах по Романкевичу (Романкевич, Ветров, 2013), ОВ которых полностью представлено автохтонным ОВ. В целом полученные значения содержания растворенного автохтонно-

го ОВ в исследованных объектах следует считать достаточно низкими. По-видимому, это является особенностью поверхностных природных вод гумидной зоны, в которых продукционно-деструкционные процессы приводят к низкому сбалансированному содержанию растворенного автохтонного ОВ. Таким образом, по содержанию ОВ озера гумидной зоны отличаются различной концентрацией в них аллохтонного ОВ при малой изменчивости содержания автохтонного ОВ.

Уровень трофии существенно отражается на содержании взвешенного автохтонного ОВ. Особенно это заметно в вегетационный период в эвтрофных (Святозеро и Крошнозеро) и мезотрофных (Валгомозеро и Яндомозеро) озерах. Так в оз. Святозеро в летний период 2012 г. при «цветении» воды величина ХПК взвешенного автохтонного ОВ составила 16,7 мг О/л (68 % от общего содержания автохтонного ОВ).

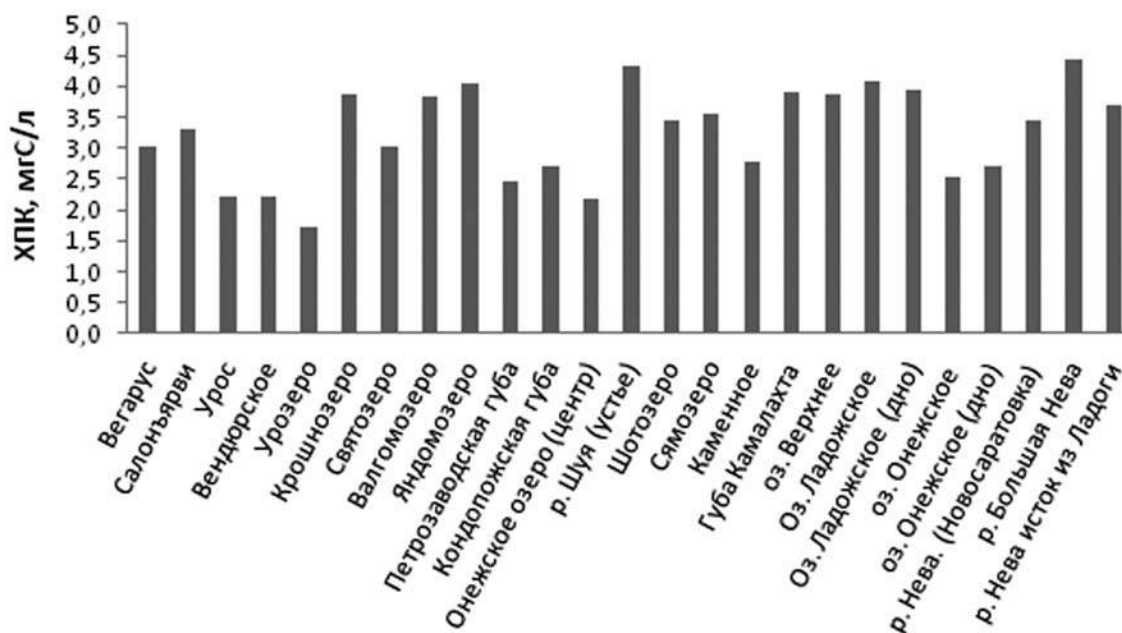


Рис. 2. Содержание растворенного автохтонного ОВ в водных объектах Карелии

Анализируя сезонную динамику общего содержания автохтонного ОВ (растворенного и взвешенного), следует отметить, что в зимний период его доля была самой низкой, что связано с практически отсутствием продуцирования ОВ. В период открытой воды доля автохтонного ОВ увеличивалась, что обусловлено активной вегетацией фитопланктона. Это отражается и на содержании взвешенных веществ, концентрация которых зимой была наименьшая (0,2–2,2 мг/л) по сравнению с другими сезонами года (0,4–7,3 мг/л). Именно поэтому зимой взвешенное ОВ мы относили к аллохтонному ОВ, а не к автохтонному, как в другие сезоны года.

В период открытой воды наибольшее содержание автохтонного ОВ приходилось либо на весенний (как в оз. Крошнозеро, Петрозаводской и Кондопожской губах), либо на летний (в большинстве объектов) или осенний (как в озерах Яндомозеро, Вендюрское), сезон, что, по-видимому, связано с особенностями вегетации фитопланктона в отдельно взятых объектах (табл.).

Сезонная динамика общего содержания автохтонного ОВ имела разный характер в водоемах с различным уровнем трофии (рис. 3). В олиготрофных озерах Урос, Урозеро, Каменное и Вендюрское содержание автохтонного ОВ изменялось в течение года незначительно и варьировало в пределах от 4,7 до 11,8 мг О/л. В мезотрофных водоемах наблюдался значительный рост доли автохтонного ОВ в период от зимы к лету и постепенное снижение осенью. Особенно эта динамика была заметна в озерах Яндомозеро и Валгомозеро, где максимальная концентрация ОВ составила 20,1 и 17,1 мг О/л соответственно. Наибольшим содержанием автохтонного ОВ в вегетационный период отличались эвтрофные озера Святозеро (до 26,1 мг С/л) и Крошнозеро (до 16,9 мг О/л). На фоне всех объектов существенно выделяется оз. Святозеро, в котором летом 2012 г. наблюдалось «цветение» воды, чему способствовало аномально высокое содержание общего фосфора в этом озере (выше 220 мкг/л).

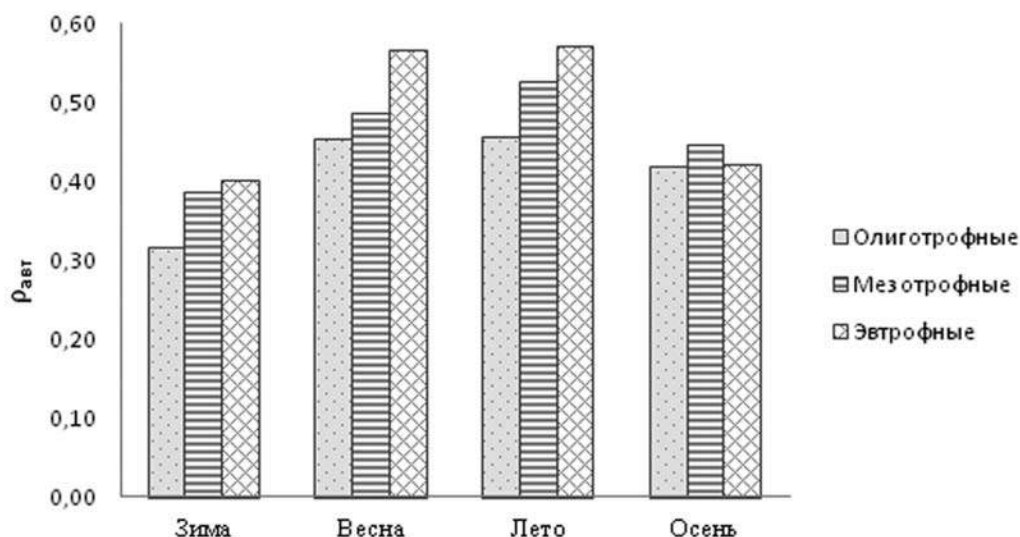


Рис. 3. Сезонное распределение автохтонного ОВ ($\rho_{\text{авт}}$) в водных объектах Карелии с различным уровнем трофии

Распределение автохтонного ОВ в исследованных объектах по сезонам 2012–2014 гг.

Озеро	Зима		Весна		Лето		Осень	
	$\rho_{\text{авт}}$	ХПК _{авт} ^а мг О/л	$\rho_{\text{авт}}$	ХПК _{авт} ^а мг О/л	$\rho_{\text{авт}}$	ХПК _{авт} ^а мг О/л	$\rho_{\text{авт}}$	ХПК _{авт} ^а мг О/л
Урос	0,45	5,0	0,64	7,0	0,59	5,9	0,57	7,9
Вендорское	0,31	4,7	0,47	8,6	0,43	7,9	0,53	11,8
Вегарус	0,16	7,9	0,25	8,6	0,23	8,9	0,24	9,6
Салонъярви	0,19	7,7	0,21	7,8	0,31	12,9	0,19	12,0
Крошозеро	0,33	11,6	0,48	16,9	0,40	13,1	0,34	10,6
Святозеро	0,47	8,4	0,65	12,4	0,74	26,1	0,50	10,0
Валгомозеро	0,48	7,0	0,61	13,2	0,68	17,1	0,62	12,6
Яндомозеро	0,47	9,6	0,65	18,2	0,64	14,0	0,55	20,1
Урозеро	0,50	6,0	0,76	5,8	0,77	6,3	0,72	6,3
Петрозаводская губа	0,26	5,5	0,41	9,9	0,47	7,3	0,35	6,3
Кондопожская губа	0,29	5,9	0,38	9,2	0,48	8,7	0,36	6,3
Онежское озеро (центр)	0,35	6,0	0,48	7,7	0,42	7,0	0,25	4,0
р. Шуя (устье)	0,25	11,5	0,28	9,4	0,37	14,4	0,49	15,0
Шотозеро	0,17	10,5	0,23	9,3	0,30	10,6	0,32	10,7
Сямозеро	0,40	9,9	0,47	10,8	0,47	10,6	0,42	10,0
Каменное	0,33	7,2	–	–	0,44	7,9	–	–
Губа Камалахта	0,35	11,6	–	–	0,44	9,0	–	–
Верхнее	–	–	0,16	10,2	0,13	10,5	0,19	13,1
Ладожское (фотический слой)	–	–	0,51	11,7	0,53	11,7	0,44	11,2
Ладожское (придонный слой)	–	–	0,53	13,2	0,42	8,9	0,6	16,7
Онежское (фотический слой)	–	–	0,41	7,6	0,35	6,3	0,44	6,3
Онежское (придонный слой)	–	–	0,37	8,0	0,32	6,2	0,48	7,3
р. Нева (исток из Ладоги)	–	–	–	–	0,41	10,2	–	–
р. Нева (Новосаратовка)	–	–	0,4	10,1	0,41	10,2	–	–
р. Большая Нева	–	–	0,51	13,6	0,5	14,2	–	–
Средние значения и пределы колебаний ХПК _{авт}	8,0 4,7 – 11,6		10,4 5,8 – 18,2		10,6 5,5 – 26,1		10,5 4,0 – 20,1	

Что касается крупного олиготрофного Онежского озера, то можно отметить, что содержание автохтонного ОВ во все гидрологические сезоны изменялось слабо (см. табл.), особенно это характерно для центрального плеса озера, где концентрация ОВ не превышала 7,7 мг О/л. Однако в Петрозаводской и Кондопожской губах содержание автохтонного ОВ в вегетационный период было несколько

выше, чем в центре, и составляло 9,9 и 9,2 мг О/л соответственно, что, по-видимому, связано с большим уровнем трофии этих губ.

В 2013 г. было проведено исследование содержания органического углерода в воде исследуемых водных объектов (до и после адсорбции) фотохимическим персульфатным методом. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении содержания органического углерода в пробах воды после адсорбции по сравнению с исходными (рис. 4). Содержание органического углерода в воде после адсорбции изменялось в пределах от 1,3 до 3,2 мг С/л (среднее – 2,2 мг С/л) и отвечало брутто формуле $C_6(H_2O)_{1,9}H_{6,7}NH_3$, полученной с помощью расчетно-аналитического метода (Лозовик, 2006; Авторское свидетельство, 2010). По этой формуле видно, что автохтонное ОВ является достаточно восстановленным. Концентрация ОВ, рассчитанная по брутто формуле, равняется 4,0 мг/л. Количество углерода в ОВ составляет 55,3 %, водорода – 10,4, кислорода – 23,6, а азота – 10,7 %.

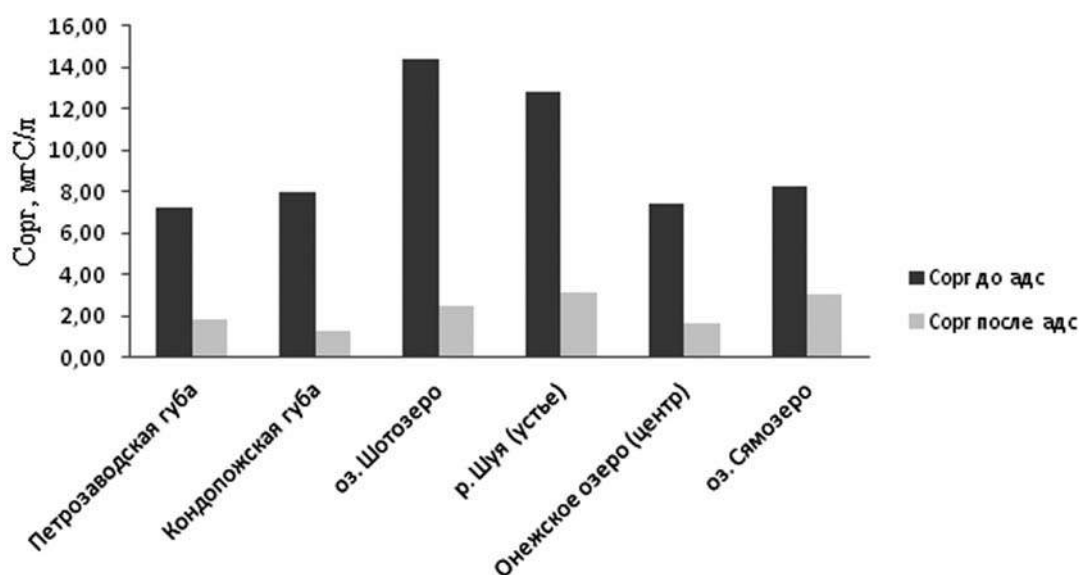


Рис. 4. Содержание органического углерода в воде до и после адсорбции

В 2014 г. проведено исследование содержания гумусовых веществ в составе аллохтонного ОВ. Гумусовые вещества представляют собой темноокрашенные высокомолекулярные соединения нерегулярной структуры, образующиеся в результате трансформации органических остатков растений и животных под воздействием биологических и химических процессов (Aiken et al., 1985; Huizhong Ma et al., 2001). К гумусовым веществам относят гуминовые кислоты (растворимые только в щелочах), фульвовые кислоты (растворимые в щелочах и кислотах) и гумин (нерастворимое органическое соединение). Главным источником поступления гумусовых веществ в природные воды являются почвы (более 80 % почвенного ОВ) и торфяники, из которых они вымываются дождевыми и болотными водами. Значительная часть гумусовых веществ вносится в водоемы вместе с пылью. Гумусовые вещества составляют большую часть ОВ природных вод (более 60 %) (Ertel et al., 1986; Giovanela et al., 2004).

В качестве объекта исследования было выбрано высокогумусное озеро Верхнее. Схема исследования заключалась в следующем: исходную воду адсорбировали по разработанной методике (Лозовик, Мусатова, 2013). Затем ДЭАЭ-целлюлозу с аллохтонным ОВ обрабатывали щелочью для десорбции гумусовых веществ, нейтрализовывали и таким образом получали раствор гумусовых веществ. Раствор выпаривали до небольшого объема для концентрирования ОВ, а потом разделяли на фульвовые и гуминовые кислоты путем добавления соляной кислоты. В результате осаждались гуминовые кислоты, а в растворе оставались фульвовые кислоты.

Установлено, что доля гумусовых веществ составляет в среднем 89 % от суммарного содержания аллохтонного ОВ (рис. 5). Фульвовые кислоты преобладают в составе гумусовых веществ, на их долю приходится в среднем 76 %, а гуминовых кислот – 24 %. Содержание фульвовых кислот в различные сезоны года изменялось с 11,6 до 17,4 мг С/л, а гуминовых – с 5,4 до 7,7 мг С/л.

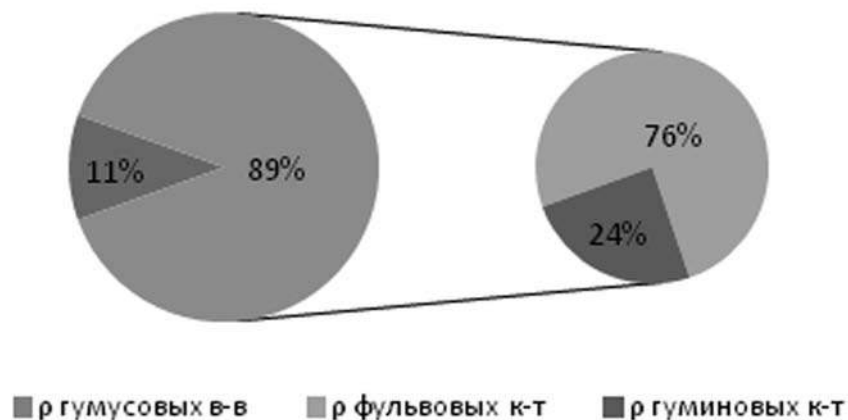


Рис. 5. Содержание гумусовых веществ в составе аллохтонного ОВ

Наличие в структуре фульвовых и гуминовых кислот карбоксильных и фенолгидроксильных групп, аминогрупп способствует образованию прочных комплексных соединений гумусовых кислот с металлами. Так как большая часть железа находится в комплексе в составе гумусовых веществ (Линник и др., 2007), интересно было проследить изменение содержания этого элемента в ходе исследований. Выяснилось, что количество железа, связанного с гумусовыми веществами, варьировало от 0,22 до 0,29 мг/л в течение года, что составляло 35–60 % от общего содержания железа. При этом большая его часть была связана с фульвовыми кислотами (0,17–0,19 мг/л), а меньшая – с гуминовыми, в которых количество железа составляло 0,010–0,025 мг/л. Кроме того, исследования показали, что высокая доля $P_{\text{общ}}$ в озерах Карелии находится в связанном состоянии с железом в составе гумусовых веществ.

Заключение

Подводя итог, следует резюмировать, что адсорбцию на ДЭАЭ-целлюлозе можно успешно использовать для разделения ОВ природных вод на автохтонную и аллохтонную составляющие. Необходимо отметить, что несмотря на гидрологические и гидрохимические отличия водных объектов гумидной зоны, абсолютное содержание растворенного автохтонного ОВ в них достаточно стабильно и составляет в среднем 3,1 мг С/л. В период вегетации определенный вклад в содержание автохтонного ОВ вносит взвешенное планктонное ОВ, особенно это заметно при цветении воды в озерах. Основное отличие озер по содержанию ОВ связано с различным количеством в них аллохтонного ОВ при малой изменчивости содержания автохтонного ОВ. В поверхностных водах гумусовые вещества составляют в среднем 89 % от суммарного содержания аллохтонного ОВ, а на долю фульвовых и гуминовых кислот в аллохтонном ОВ приходится 76 и 24 % соответственно.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют способы оценки количественного общего содержания ОВ природных вод?
2. Что такое автохтонное и аллохтонное ОВ?
3. Почему отсутствуют надежные количественные методы определения автохтонного и аллохтонного ОВ природных вод?
4. Какие процессы влияют на сезонную динамику общего содержания автохтонного ОВ?
5. Что такое гумусовые вещества и каковы источники их поступления в природные воды?

Литература

Варшал Г. М., Велюханова Т. К., Сироткина И. С. Фракционирование, количественное определение и изучение некоторых основных компонентов растворенных органических веществ природных вод // Гидрохим. материалы. 1973. Т. 59. С. 143–151.

Зобков М. Б. А. с. 2010612351 РФ на программу для ЭВМ Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов (АИС „ОГХИ“») от 31.04.2010 // Бюл. RU ОБПБТ. 2010. № 2 (71). С. 563.

Линник П. Н., Васильчук П. А., Линник Р. П., Игнатенко И. И. Сосуществующие формы тяжелых металлов в поверхностных водах Украины и роль органических веществ в их миграции // Методы и объекты химического анализа. 2007. Т. 2, № 2. С. 130–145.

Лозовик П. А. Расчетно-аналитический метод оценки содержания и элементного состава органического вещества природных вод // Журн. аналитической химии. 2006. Т. 61, № 6. С. 592–597.

Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б. и др. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

РД 52.24.40-87. Методические указания. Определение гумусовых веществ в природных водах. Ростов н/Д: ГХИ, 1987. 12 с.

РД 52.24.421-2012. Методические указания. Химическое потребление кислорода. Методика выполнения измерений титриметрическим методом. Ростов н/Д: ГХИ, 2012. 16 с.

Романкевич Е. А., Ветров А. А. Массы углерода в гидросфере земли // Геохимия. 2013. № 6. С. 483–509.

Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). 290 с.

Aiken G. R., McKnight D. M., Wershaw R. L., MacCarthy P. An introduction to humic substances in soil, sediment, and water // Humic substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation, and Characterization. Eds. Wiley, New York, 1985. P. 1–9.

Giovanella M., Parlanti E., Soriano-Sierra E. J. et al. Elemental compositions, ET-IR spectra and thermal behavior of sedimentary fulvic and humic acids from aquatic and terrestrial environments // Geochemical Journal. 2004. 38. P. 255–264.

Huizhong M., Herbert E. A., Yujun Y. Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent // Wat. Res. 2001. 35. P. 985–996.

John R. E., John I. H., Allan H. D., Jeffrey E. R. Dissolved humic substances of the Amazon river system // Limnol. Oceanogr. 1986. 31(4). P. 739–754.

Sandford R. C., Bol R., Worsfold P. J. In situ determination of dissolved organic carbon in freshwaters using a reagentless UV sensor // Journal of Environmental Monitoring. 2010. N 12. P. 1678–1683.

Spyres G., Nimmo M., Worsfold P. J. et al. Determination of Dissolved Organic Carbon in Seawater using High Temperature Catalytic Oxidation Techniques / TrAC, Trends Anal. Chem. 2000. 19. 498 p.

Stedmon C. A., Markager S. Resolving the Variability in Dissolved Organic Matter Fluorescence in a Temperate Estuary and its Catchment using PARAFAC Analysis / Limnol. Oceanogr. 2005. 50. 686 p.

Urbansky E. T. Total organic carbon analyzers as tools for measuring carbonaceous matter in natural waters // Journal of Environmental Monitoring; feb 2001. 3(1). P. 102–112.

УГЛЕВОДЫ И ЛИПИДЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Т. А. Ефремова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Введение

Изучение углеводов и липидов в поверхностных водах представляет несомненный интерес, поскольку они являются основными и в то же время малоизученными компонентами органического вещества (ОВ). Органическое вещество природных вод состоит из следующих основных компонентов: углеводов, белков, липидов, аминокислот, мочевины и др. Изучение состава ОВ необходимо для познания цикла углерода в биосфере (Вернадский, 1965). Большое значение для нормального метаболизма водной экосистемы имеют не запасы ОВ, а наличие в составе растворенного, взвешенного ОВ легкоусвояемых биохимических компонентов (углеводов, липидов, белков) и интенсивность превращения метаболитов на разных трофических уровнях экосистемы данного водоема. В водных экосистемах фитопланктон и микрофитобентос являются основным продуцентом ОВ, и именно этой группе организмов принадлежит доминирующая роль в формировании «глобальной первичной

продукции» (Раймонд, 1983; Саут, Уиттик, 1990). Определение химического состава ОВ позволяет судить о происхождении, трансформации и запасах ОВ в экосистеме. Химический состав ОВ меняется в зависимости как от интенсивности первичного продуцирования, поступления его с суши, так и от интенсивности преобразования ОВ вторичными продуцентами.

Изложение материала

Углеводы и липиды являются как исходными составляющими живого ОВ, так и продуктами их жизнедеятельности в водной толще. Они могут существовать в живых организмах при поддержке метаболических реакций и в неустойчивом состоянии в водной среде после их гибели.

Речной сток – основной путь поступления ОВ наземной растительности в водоем. С суши в озеро поступают продукты трансформации ОВ, среди них вместе с высокомолекулярными гуминовыми веществами почв переносятся полициклические ароматические углеводороды, которые не синтезируются сообществом водных организмов. Почвы служат также источником природных полимерных соединений, образованных из простых липидных молекул, которые могут поступать в водоемы с речным стоком (Беляева, 2004).

Основным продуктом первичного продуцирования водорослей являются углеводы, которые затем преобразуются в другие соединения в результате клеточного метаболизма и метаболизма всей экосистемы. Отмечена высокая корреляция между количеством растворенных углеводов и интенсивностью первичного продуцирования (Агатова и др., 2004).

Одним из важнейших компонентов живого ОВ являются липиды, в значительной степени определяющие структурно-функциональные особенности и энергетический потенциал как клетки, так и организма в целом. В живом организме липиды выполняют энергетическую, транспортную, защитную функцию и являются структурными компонентами клеточных мембран (Дембицкий, 1996; Усов, Чижов, 1998). Существует более 10 классов липидов, различающихся по своему химическому строению. Наиболее распространенными являются триацилглицеролы, воска, фосфоглицериды, стеролы и их эфиры с жирными кислотами. К липидам относят и разнообразные углеводороды. Такой широкий спектр химических соединений объединяет одно общее свойство – они не растворимы в воде, а растворимы только в слабополярных растворителях. Исследование углеводов и липидов в водной экосистеме представляет интерес во многих отношениях:

1) Углеводы и липиды – одни из важнейших классов ОВ, имеющие важное значение в функционировании водных экосистем, так как их образование в водоеме связано с жизнедеятельностью живых организмов и среды их обитания.

2) Эти соединения имеют большое значение при изучении процесса круговорота ОВ в водоеме. Углеводы – первые продукты фотосинтеза. В живых организмах наиболее реакционноспособными являются моносахариды, тогда как полисахариды выполняют резервные и структурные функции. Резервные углеводы живых водных организмов легче разлагаются по сравнению со структурными (Кодина, Галимов, 1984). Углеводы растворенного вещества, взвеси взаимодействуют между собой, а также с продуктами распада других биополимеров и образуют в природных условиях геополимеры – сложные комплексные соединения типа фульво- и гуминовых кислот.

Липиды являются наиболее энергоемкими (восстановленными) соединениями. Полное окисление 1 г липидов липазами обеспечивает выделение в среднем 40 кДж энергии и 1,07 г воды. Часть липидов (фосфолипиды) обогащены фосфором, они служат важным резервом вещества и энергии для биопродукционных процессов в водоемах (Хайлов, 1971). С трансформацией липидов в геохимии связывают процессы нефтеобразования (Романкевич, 1977).

3) Поскольку углеводы и липиды являются важными компонентами ОВ в незагрязненных водоемах, то наблюдения за их превращениями входят в программу фонового мониторинга. Липиды обладают выраженной способностью концентрироваться на поверхности раздела фаз, в том числе на границе вода – атмосфера, образуя тонкую пленку.

Имеющиеся в литературе сведения о содержании, распределении и трансформации углеводов и липидов довольно ограничены для поверхностных вод, хотя накоплен обширный материал в морской гидрохимии (Беляева, Романкевич, 1976; Беляева, Шелагина, 1993; Агатова и др., 1994, 2002, 2004, 2011; Беляева, 2004; Jeffrey, 1970). Что касается пресных континентальных водоемов, то для них име-

ются лишь ограниченные данные (Бикбулатов, Скопинцев, 1974; Сабылина, Семенов, 1981; Сабылина, 1982; Сабылина, Ипатова, 1985; Holm-Hanses, 1972).

Определение общего содержания углеводов в природной воде

Выделение и прямое определение углеводов, содержащихся в поверхностных и морских водах, связано с большими экспериментальными трудностями. Поэтому об их содержании обычно судят по учету продуктов кислотного гидролиза, обуславливающего расщепление сложных углеводов и превращение их в моносахариды, которые определяются количественно.

Методы количественного определения углеводов делятся на две группы: методы, основанные на окислительно-восстановительных реакциях (восстановление двухвалентной меди сахарами в щелочной среде) (Семенов и др., 1964; Шаова, 1971; Levis, Rakesfrow, 1955), и спектрофотометрические методы (см. далее).

Существует несколько спектрофотометрических методов определения общего количества углеводов в разных водных экосистемах (растворенных, взвешенных, в иловых водах и донных осадках). Большинство из них основано на образовании окрашенных комплексов фурфуроловых производных углеводов с ароматическими соединениями, такими как антрон, N-этилкарбазол, орцинол, фенол и триптофан. При кислотном гидролизе проб воды образуются моносахариды, которые превращаются в фурфурол и его производные. Далее они количественно реагируют с ароматическими соединениями, указанными выше, образуя окрашенные соединения (Morse, 1947; Dische, 1955; Lewis, Rakestrow, 1955; Dubois et al., 1956).

Определение общего содержания липидов в природной воде

Анализ включает две самостоятельные части: 1) выделение липидов из исследуемого материала (воды) методом экстракции; 2) непосредственное определение концентрации липидов в экстракте.

1. Экстракция растворенных липидов, как правило, производится из свежесобранных проб. В зависимости от степени экстрагируемости липиды условно разделяют на свободные, связанные и прочносвязанные. Свободные липиды легко переходят в слабополярные растворители (петroleumный и диэтиловый эфиры, хлороформ, бензол и др.), способные разрушать комплексы, образованные за счет гидрофобных взаимодействий и ван-дер-ваальсовых сил. Для извлечения связанных липидов, удерживаемых в комплексах водородными связями, применяют более полярный растворитель (метанол или этанол) в смеси со слабополярными.

2. Колориметрический метод определения общих липидов с использованием сульфованилинового реактива. В основе этого метода лежит цветная реакция ванилина в кислой среде с липидами. Сульфосфосфованилиновую реакцию с образованием интенсивного (от желтого до вишневого) окрашивания дают все классы липидов. Хромогенными группами являются гидроксильные и карбонильные в определенном положении.

Более подробно содержание и распределение углеводов и липидов интересно будет рассмотреть на примере водных объектов Карелии. Исследование содержания углеводов и липидов проводилось в разнотипных водных объектах Карелии, отличающихся между собой по гидрологическим и гидрохимическим показателям. Изученные озера были сгруппированы по соответствующим группам водных объектов с использованием геохимической классификации поверхностных вод гумидной зоны П. А. Лозовика (2013). Количественное определение углеводов было проведено спектрофотометрическим методом с использованием L-триптофанового реактива, липидов – с фосфованилиновым реактивом (Лозовик, 2013).

В результате анализа проб воды на разнотипных водных объектах Карелии выяснилось, что содержание углеводов в большой степени зависит от трофии* и гумусности** водоемов (рис. 1–2).

* Трофность – характеристика водоема по его биологической продуктивности, обусловленной содержанием биогенов.

** Гумусовые вещества – темноокрашенные органические соединения, входящие в состав гумуса и образующиеся в процессе гумификации растительных и животных остатков в почве.

Водоемы можно классифицировать по уровню трофности (продуктивности):

- дистрофные;
- олиготрофные – водоемы с низким уровнем первичной продуктивности, низким содержанием органических веществ;
- мезотрофные;
- эвтрофные.

Повышение трофности приводит к цветению воды, т. е. численному росту цианобактерий и низших одноклеточных водорослей – зеленых, диатомовых. С точки зрения народнохозяйственных целей цветущий водоем является неблагоприятным, так как непригоден для большинства вариантов природопользования.

Анализируя распределение общих углеводов в поверхностных водах в зависимости от их трофности (рис. 1) и гумусности (рис. 2), можно отметить следующие закономерности. Прежде всего содержание общих углеводов одинаковое в олиго- и мезотрофных водоемах, и повышенное их количество наблюдается только в эвтрофных водоемах по сравнению с первыми (рис. 1). В последних наиболее высокие концентрации общих углеводов отмечены только при «цветении» воды (в нашем случае максимальное количество было в оз. Святозеро (11 мг/л), когда летом 2012 г. в нем «цвела» вода). Как видно из рис. 2, в олиго- и мезотрофных водоемах происходит увеличение содержания общих углеводов с ростом гумусности их воды, тогда как в эвтрофных она не проявляется. По-видимому, повышенное содержание углеводов в последних связано с фотосинтетической деятельностью планктона, а не с гумусностью воды.

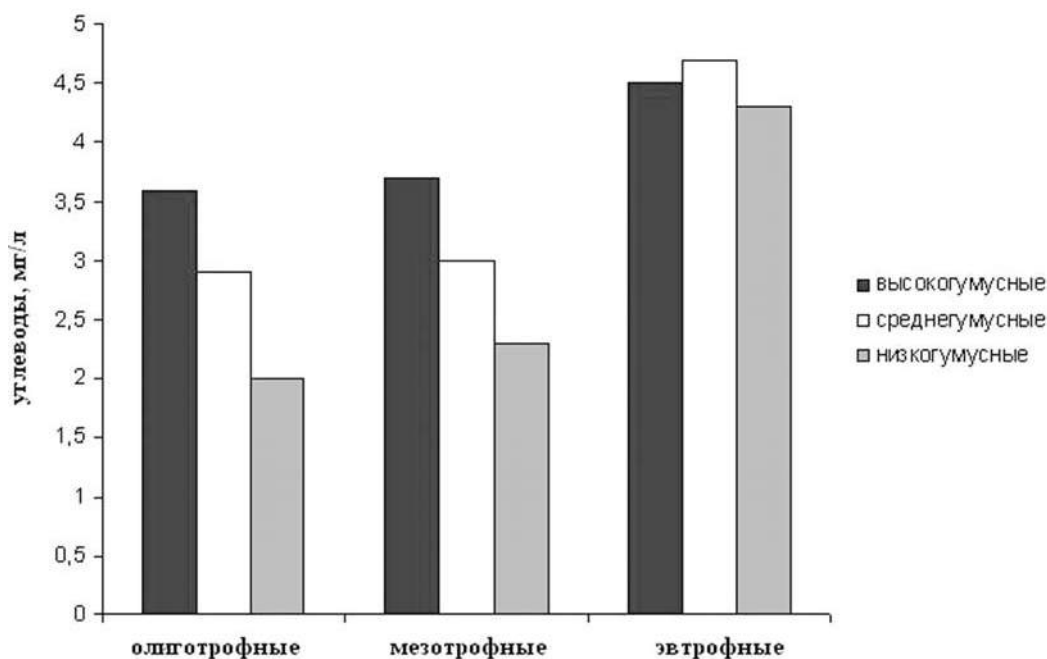


Рис. 1. Распределение содержания общих углеводов в водных объектах в зависимости от уровня их трофии с учетом их гумусности

В олиго- и мезотрофных водоемах в связи с низкой продуктивностью планктона в них повышенное содержание общих углеводов отмечается в высокогумусных водоемах по сравнению с низкогумусными. Это дает основание полагать, что в состав общих углеводов входят углеводы, связанные с гумусовыми веществами. Это является вполне закономерным, поскольку считается, что гумусовые вещества – это продукты конденсации лигнина, углеводов, белков и других веществ (Кононова, 1951; Орлов, 1990). Для подтверждения того факта, что в воде возможно наличие углеводов, связанных с гумусовыми веществами, было проведено разделение ОВ природных вод на аллохтонную и автохтонную составляющие с использованием адсорбции на ДЭАЭ-целлюлозе в динамическом режиме (Лозовик, Мусатова, 2013).

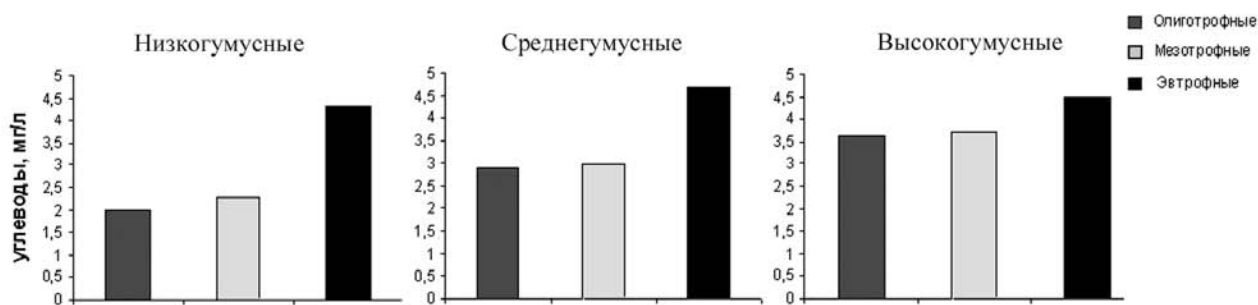


Рис. 2. Распределение содержания общих углеводов в исследуемых водных объектах Карелии в зависимости от их гумусности с учетом уровня их трофии

В воде после адсорбции определяли углеводы, входящие в состав автохтонного ОВ, которые именовали как свободные углеводы ($Y_{\text{своб}}$), в отличие от углеводов, связанных с гумусовыми веществами. В воде после удаления взвешенных веществ центрифугированием устанавливали содержание растворенных углеводов ($Y_{\text{раств}}$). По разности между содержанием $Y_{\text{раств}}$ и $Y_{\text{своб}}$ находили концентрацию связанных углеводов ($Y_{\text{связ}}$). Углеводы во взвеси ($Y_{\text{взв}}$) вычисляли по разности $Y_{\text{общ}}$ и $Y_{\text{раств}}$ после центрифугирования проб воды, а также путем анализа взвеси, выделяемой фильтрованием воды через стекловолнистые фильтры.

Таким образом, выполняя систематический анализ углеводов в воде после ее различной обработки, выделили следующие фракции углеводов в воде: связанные ($Y_{\text{связ}}$), свободные ($Y_{\text{своб}}$) и взвешенные ($Y_{\text{взв}}$).

При анализе связи содержания углеводов и доли автохтонного ОВ установлено, что общее содержание углеводов уменьшается с увеличением доли последнего (рис. 3). В то же время количество свободных углеводов мало меняется с изменением содержания растворенного автохтонного ОВ, за исключением эвтрофных озер в период «цветения» воды. Так, из всех объектов, представленных на рис. 3, существенно выделяется оз. Святозеро, в котором летом общая концентрация углеводов достигала 11,0 мг/л, но при этом наблюдалось «цветение» воды. Следует также отметить, что и количество растворенного автохтонного ОВ достаточно постоянно в водных объектах (Лозовик, Мусатова, 2013).

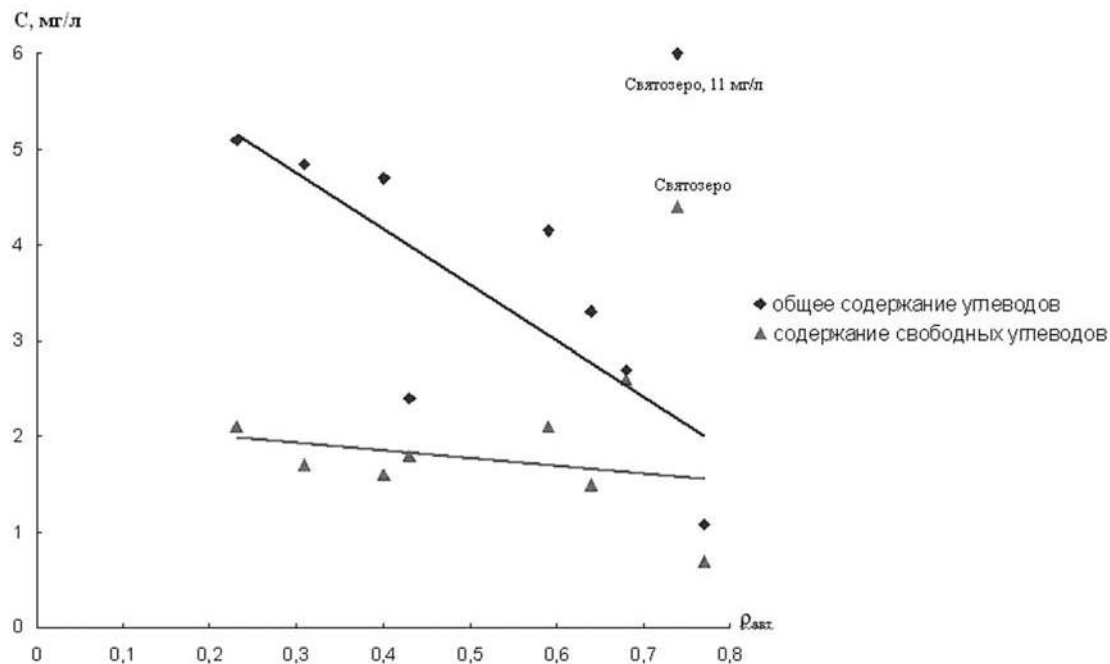


Рис. 3. Зависимость содержания углеводов в воде озер от доли в них автохтонного ОВ по данным наблюдений в летний период 2012 г.

Все данные по распределению различных форм углеводов в поверхностных водах Карелии, полученные с 2011 по 2013 г., были статистически обработаны ($n = 138$) (табл. 1).

Таблица 1

Статистические показатели содержания различных форм углеводов в поверхностных водах Карелии

Показатель	Углеводы, мг/л				
	Общие	Растворенные	Свободные	Связанные	Взвешенные (центрифуг.)
Среднее арифметическое	3,2	3,0	1,9	0,8	0,7
Среднее геометрическое	2,8	2,7	1,6	0,9	0,5
Медианное значение	3,1	2,9	1,8	0,7	0,6
1 квартиль	2,0	2,0	1,3	0,3	0,2
3 квартиль	4,2	3,6	2,4	1,2	0,9
Ст. отклонение	1,6	1,2	0,9	0,8	1,0
Min	0,7	0,6	0,3	<0,1	0,1
Max	11,0	5,7	4,5	3,9	6,3

Согласно данным табл. 1, в поверхностных водах превалируют растворенные углеводы. В большей части объектов их доля составляет 82–96 %, и только в эвтрофных озерах, особенно при «цветении» воды, она снижается до 43 %. Количество углеводов в составе взвеси незначительное (7–17 %), в среднем 14 %. Наибольший их процент отмечается в эвтрофных озерах при их «цветении». Что касается $Y_{\text{связ}}$, то их максимальное количество наблюдается в высокогумусных водоемах (27–51 % от $Y_{\text{общ}}$), а $Y_{\text{своб}}$ – в низко- и среднегумусных (47–72 %). На долю свободных, связанных и взвешенных углеводов приходится 59, 22 и 19 % соответственно от общего содержания углеводов в воде (рис. 4). На диаграмме видно, что полученное распределение форм углеводов в поверхностных водах отражает их поступление с водосборной территории в составе гумусовых веществ ($Y_{\text{связ}}$) и их образование в самом водоеме в результате протекания продукционно-деструкционных процессов ($Y_{\text{своб}}$). Это распределение является достаточно устойчивым и характерным для поверхностных вод гумидной зоны. Полученные данные свидетельствуют о том, что гумусовые вещества вносят свой вклад в общее содержание углеводов.

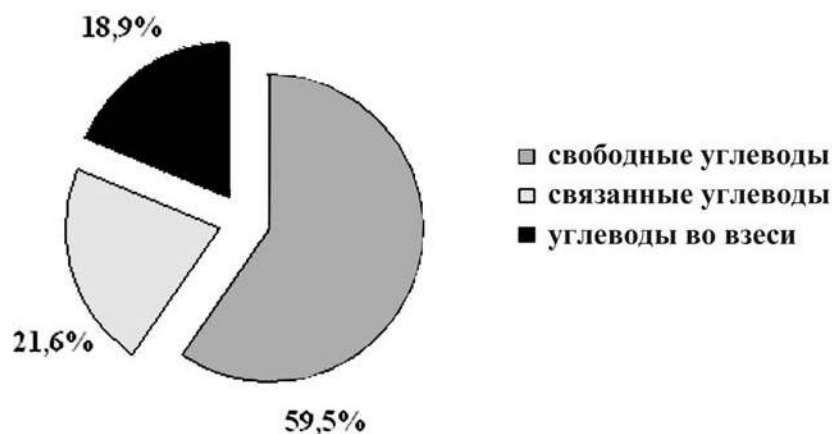


Рис. 4. Доля свободных, связанных углеводов и углеводов во взвеси от их общего содержания в поверхностных водах Карелии

Анализируя статистические данные по распределению различных форм углеводов в поверхностных водах Карелии, следует отметить, что их содержание изменяется в достаточно узких пределах (см. табл. 1) независимо от гумусности и трофности водных объектов. И только при «цветении» воды в эвтрофных водоемах наблюдается резкое увеличение содержания $Y_{\text{своб}}$ и $Y_{\text{взв}}$, и количество последних становится доминирующим.

Параллельно с изучением углеводов в природных водах Карелии с 2011 по 2013 г. осуществлялось исследование содержания липидов в разнотипных водных объектах. Концентрация липидов

в 18 исследуемых озерах изменялась от 0,18 до 1,37 мг/л (в среднем 0,29) или от 0,14 до 1,0 мг С/л (в среднем 0,23).

Полученные данные по содержанию липидов в поверхностных водах Карелии с 2011 по 2013 г. по всем пробам воды ($n = 80$) были статистически обработаны (табл. 2).

Таблица 2

**Статистические показатели распределения липидов и содержания ОВ (по ХПК)
в поверхностных водах Карелии**

Показатель	Липиды, мг/л	ХПК, мг О/л	Липиды, % от ОВ
Среднее арифметическое	0,29	27,38	1,4
Среднее геометрическое	0,22	24,6	1,2
Медиана	0,24	24,4	1,3
1-й квартиль	0,16	19,9	1,07
3-й квартиль	0,37	35,5	1,4
Ст. отклонение	0,21	12,18	2,3
min	0,017	7,6	0,3
max	1,37	63,3	2,9

Среднее содержание липидов в исследуемых озерах Карелии олиго- и мезотрофной группы приблизительно одинаковое и равняется 0,26 и 0,25 мг/л, а в эвтрофных озерах – 0,43 мг/л. Анализ связи содержания липидов и гумусности воды показал отсутствие такой закономерности. Это дает основание полагать, что липиды в поверхностных водах находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ и образуются в результате протекания продукционно-деструкционных процессов.

Сезонное распределение липидов имеет свои особенности, которые связаны с продуцированием ОВ в водоемах (рис. 5). В зимний период, когда отсутствует продуцирование ОВ, наблюдается наименьшее их количество. Весной происходит резкое увеличение концентрации липидов в олиго- и мезотрофных водоемах. Такая особенность распределения связана с вегетацией диатомового планктона, в котором содержание липидов достигает 40 %. Летом содержание липидов в олиго- и мезотрофных водоемах снижается по сравнению с весной, но существенно нарастает в эвтрофных. В последних это уже связано с бурным развитием фитопланктона в этой группе водоемов. Осенью распределение липидов по трофии выглядит аналогично весеннему, но их количество меньше, чем весной. В целом следует отметить, что распределение липидов по сезонам года всецело отражает развитие планктонных сообществ в водных экосистемах.

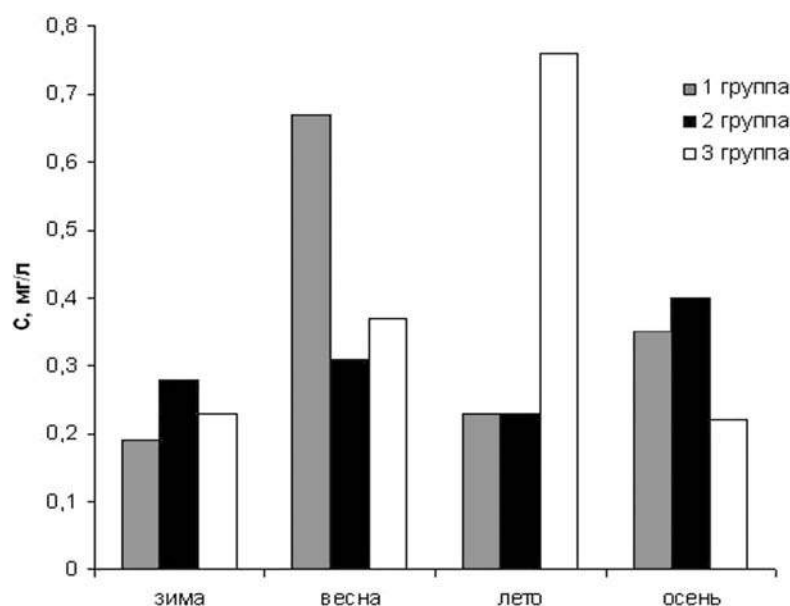


Рис. 5. Распределение концентрации липидов в воде озер Карелии с разным уровнем трофии в сезонном плане в 2012–2013 гг.

В заключение еще раз следует напомнить о важнейших закономерностях распределения углеводов и липидов в природных водах Карелии.

1) Углеводы в поверхностных водах представлены в трех формах, имеющих разные источники происхождения: связанные углеводы в составе аллохтонного ОВ, свободные углеводы в составе автохтонного ОВ и взвешенные углеводы.

2) Содержание углеводов в поверхностных водах Карелии, включая Онежское озеро, имеет близкие значения. Медианные их концентрации: общие углеводы – 3,2 мг/л, связанные – 0,8 мг/л, свободные – 1,9 мг/л, взвешенные – 0,7 мг/л.

3) Сезонная динамика и распределение углеводов по уровню трофии водоемов слабо выражена. Единственное, что имеет место, – это высокое их содержание в эвтрофных водоемах летом.

4) В отличие от углеводов липиды в поверхностных водах имеют преимущественно автохтонное происхождение и связаны с продукционно-деструкционными процессами в водоемах. Их динамика в водоемах определяется сезонной изменчивостью функционирования биоты. Максимальная концентрация липидов отмечалась в весенний период в олиго- и мезотрофных водоемах, когда активно идет вегетация диатомового планктона, а в летний – в эвтрофных водоемах. Зимой, когда продуцирование ОВ незначительно, концентрации липидов наименьшие и их содержание не зависит от уровня трофии водоемов.

Медианные концентрации липидов в поверхностных водах Карелии составляют 0,24 мг/л. В Онежском озере и в Белом море их количество близко к этой величине.

5) Содержание общих углеводов в поверхностных водах составляет 16 % от общего количества ОВ, связанных – 7 % от содержания аллохтонного ОВ, свободных – 28 % от количества автохтонного ОВ, углеводов во взвеси – 23 % от содержания взвешенного органического вещества, а липидов – 3,7 % от автохтонного ОВ.

6) Соотношение липидов и свободных углеводов в поверхностных водах 1 : 7, что близко к их соотношению в большинстве живых организмов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой интерес представляет изучение углеводов и липидов в водной экосистеме?
2. Какой основной продукт первичного продуцирования водорослей?
3. Какие методы определения углеводов и липидов Вы знаете?
4. Существует ли зависимость содержания общих углеводов от гумусности воды?
5. Какие концентрации углеводов и липидов определены в поверхностных водах Карелии?

Литература

Агатова А. И., Дафнер Е. В., Торгунова Н. И. Биохимический состав органического вещества Белого моря и скорости регенерации биогенных элементов в летний период // Комплексные исследования экосистемы Белого моря / Под ред. В. В. Сапожникова. М., 1994. С. 53–76.

Агатова А. И., Торгунова Н. И., Лапина Н. М., Кирпичев К. Б. Биогидрохимическая основа продуктивности глубоководной части Белого моря // Океанология. 2002. Т. 42, № 3. С. 370–377.

Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. и др. Органическое вещество и скорость его трансформации в нерестово-нагульных озерах Камчатки // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 6. С. 691–701.

Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Органическое вещество, его элементарный и биохимический состав в водах российской части Арктического бассейна в современных условиях // Океанология. 2011. Т. 51, № 3. С. 450–460.

Беляева А. Н. Молекулярный состав органического вещества в океане // Новые идеи в океанологии. 2004. Т. 2. С. 325–350.

Беляева А. Н., Романкевич Е. А. Химические превращения липидов при седиментогенезе в океане // Исследование органического вещества современных и ископаемых осадков. М.: Наука, 1976. С. 81–103.

Беляева А. Н., Шелагина И. А. Роль сорбционных процессов в формировании состава алканов терригенных донных осадков // Докл. РАН. 1993. Т. 331, № 5. С. 599–602.

Бикбулатов Э. С., Скопинцев Б. А. Определение общего содержания растворенных углеводов в природных водах в присутствии гумусовых веществ // Гидрохим. материалы. 1974. Т. 60. С. 80.

Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. С. 14.

- Дембицкий В. М. Алкоксилипиды органического мира: химия и биология: Дис. ... докт. хим. наук. М., 1996. 332 с.
- Кодина Л. И., Галимов Э. М. Формирование изотопного состава углерода органического вещества «гумусового» и «сапропелевого» типов в морских отложениях // Геохимия. 1984. № 11. С. 1742–1756.
- Кононова М. М. Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения. М., 1951. 390 с.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–588.
- Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестн. МГОУ, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.
- Лозовик П. А., Ефремова Т. А., Сабылина А. В. Количественное определение содержания углеводов и липидов в поверхностных водах // Вестн. МГОУ, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 57–62.
- Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.
- Раймонд Дж. Планктон и продуктивность океана. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 214–229.
- Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М., 1977. 255 с.
- Сабылина А. В., Ипатова Р. Г. Лабильные органические вещества в воде озер Куйто // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. 214 с.
- Сабылина А. В. Липиды в поверхностных водах: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Ростов-на-Дону, 1982. 20 с.
- Сабылина А. В., Семенов А. Д. Растворенные и взвешенные липиды в воде некоторых озер Карелии // Гидрохим. материалы. 1981. Т. 83. С. 75–83.
- Саут Р., Уиттик А. Основы альгологии. М.: Мир, 1990. С. 272–279.
- Семенов А. Д. Методы исследования органического вещества природных вод // Гидрохим. материалы. 1967. Т. 45. С. 155–170.
- Семенов А. Д., Ивлева И. Н., Дацко В. Г. Методика определения микрограммовых количеств редуцирующих сахаров в придонных водах с помощью щелочного раствора двухвалентной меди // Гидрохим. материалы. 1964. Т. 34. С. 138–146.
- Усов А. И., Чижов О. С. Химические исследования водорослей. М.: Наука, 1998. 234 с.
- Хайлов К. М. Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова думка, 1971. 252 с.
- Шаова Л. Г. Самоочищение природных вод от редуцирующих сахаров: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Новочеркасск, 1971. 186 с.
- Dische Z. New color reaction for determination of sugars in polysaccharides // Methods of biochemical analysis. 1955. Vol. 2. P. 1411.
- Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J. K. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances // Analytical Chemistry. 1956. Vol. 28, N 3. P. 350–356.
- Hedges J. J. Global biogeochemical cycles: progress and problems // Mar. Chem. 1992. Vol. 39. P. 67–93.
- Holm-Hansen O. The distribution and chemical composition of particulate material in marine and fresh waters // Mem. Ist. ital. gydrobiol. Dott. M. March. 1972. Vol. 29. P. 37.
- Jeffrey L. M. Lipids of marine water // Organic matter in natural waters. Inst. Mar. Sci. Univ. Alaska, Occass. Publ. 1970. N 1. 55 p.
- Lewis G. J., Rakestrow N. W. Carbohydrate in sea water // J. Marine Research. 1955. Vol. 14. P. 235–258.
- Morse E. E. Antron in estimating low concentrations of sucrose // Anal. Chem. 1947. Vol. 19. P. 1012.