

К. К. Эдельштейн

ЛИМНОЛОГИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО

2-е издание, исправленное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования

**Книга доступна на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2020

УДК 556(075.32)
ББК 26.222.6я723
Э19

Автор:

Эдельштейн Константин Константинович — профессор, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Рецензенты:

Козлов Д. В. — доктор технических наук, первый проректор по учебной работе, ректор Московского государственного университета природообустройства;

Коронкевич Н. И. — доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией гидрологии Института географии Российской академии наук, академик Академии водохозяйственных наук;

Алексеевский Н. И. — доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрологии суши.

Эдельштейн, К. К.

Э19 Лимнология : учебное пособие для среднего профессионального образования / К. К. Эдельштейн. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 386 с. — (Профессиональное образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-13180-2

Данное пособие позволит студентам изучить процессы, происходящие в водоемах суши, и научиться их анализировать. В учебном пособии рассматриваются водоемы суши, их морфология, морфометрия, процессы водообмена, внешний теплообмен озер и водохранилищ, теплодинамический и ледовый режим, структура донных отложений, формирование солевого состава и т. д.

В учебном пособии отражены не только классические, но и новые знания о гидрологии водохранилищ, в том числе достижения лимнологов мира второй половины XX — начала XXI века.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Учебное пособие предназначено студентам среднего профессионального образования, аспирантам и преподавателям, а также всем интересующимся.

УДК 556(075.32)
ББК 26.222.6я723

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-13180-2

© Эдельштейн К. К., 2014
© Эдельштейн К. К., 2018, с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2020

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Географические особенности озер и водохранилищ.....	9
1.1. Водоемы суши и их природные ресурсы	9
1.2. Озера и озерность территорий	24
1.3. Водохранилища и пруды, их водохозяйственное назначение	34
<i>Контрольные вопросы:</i>	53
Глава 2. Озерные котловины и ложа водохранилищ	55
2.1. Процессы формирования озерных котловин и их морфогенетическая типизация	55
2.2. Морфологическая классификация водохранилищ.....	64
2.3. Морфометрические параметры и показатели водоемов	71
2.4. Батиграфические кривые чаши и ложа	76
2.5. Понятие о геометрических моделях озер и водохранилищ	80
<i>Контрольные вопросы:</i>	86
Глава 3. Водообмен озер и водохранилищ.....	87
3.1. Процессы внешнего водообмена	87
3.2. Основы расчета водного баланса водохранилищ и озер.....	91
3.3. Географические факторы структуры внешнего водообмена и воднобалансовая классификация водоемов	103
3.4. Внутренний водообмен водоемов	110
<i>Контрольные вопросы:</i>	115
Глава 4. Уровень воды и его колебания в водоемах	117
4.1. Уровенная поверхность.....	117
4.2. Колебания уровня в озерах	119
4.3. Разнотипные колебания уровня в водохранилищах	126
4.4. Экологическое зонирование ложа водохранилищ.....	130
<i>Контрольные вопросы:</i>	134
Глава 5. Динамические процессы в озерах и водохранилищах.....	136
5.1. Виды движения воды в водоемах	136
5.2. Сейши	138
5.3. Ветровое волнение	144
5.4. Течения	155
5.5. Динамическое перемешивание воды	169
<i>Контрольные вопросы:</i>	171

Глава 6. Особенности динамических процессов в стратифицированных водоемах	173
6.1. Факторы изменения плотности воды и гравитационная устойчивость.....	173
6.2. Конвективное перемешивание.....	181
6.3. Плотностные течения.....	184
<i>Контрольные вопросы:</i>	191
Глава 7. Оптические свойства воды в водоемах	192
7.1. Альbedo водной поверхности и спектральный состав проникающей в воду солнечной радиации	192
7.2. Ослабление с глубиной освещенности водной толщи и ее прозрачность	197
<i>Контрольные вопросы:</i>	200
Глава 8. Процессы внешнего теплообмена водоемов	202
8.1. Внешний теплообмен	203
8.2. Структура теплового баланса	208
<i>Контрольные вопросы:</i>	214
Глава 9. Термодинамический и ледовый режим водоемов	216
9.1. Годовой термический цикл в озерах умеренных широт	216
9.2. Термодинамическая типизация озер мира	235
9.3. Особенности годового термического цикла в долинных водохранилищах	237
9.4. Формирование и разрушение ледяного покрова	244
<i>Контрольные вопросы:</i>	252
Глава 10. Седиментация взвесей и структура донных отложений.....	254
10.1. Состав взвешенных веществ и их седиментация	254
10.2. Абразия и переработка берегов водохранилищ.....	258
10.3. Режим взвешенных веществ в водоемах и их заилие.....	262
10.4. Зональность и структура донных отложений.....	269
10.5. Методические основы палеоолиминологии.....	274
<i>Контрольные вопросы:</i>	277
Глава 11. Формирование солевого состава воды в водоемах	279
11.1. Состав растворенных минеральных веществ и их баланс в водоемах.....	279
11.2. Минерализация и ее режим в голомиктических водоемах	284
11.3. Особенности гидрологического режима меромиктических озер	292
11.4. Разновидности соленых озер и их донные отложения.....	297
<i>Контрольные вопросы:</i>	302
Глава 12. Биотическая трансформация свойств и состава водных масс	303
12.1. Важнейшие процессы трансформации химического состава воды...304	
12.2. Состав биоты в пресных и солоноватых водоемах.....	308

12.3. Биологическая продуктивность озерных экосистем	313
12.4. Внутригодовой цикл трансформации химического состава воды	319
12.5. Внешний газообмен олиготрофных озер в вегетационный сезон	329
12.6. Особенности биотической трансформации воды в водохранилищах	332
12.7. Эвтрофирование и самоочищение водоемов	335
<i>Контрольные вопросы</i>	345
Глава 13. Гидрологическая структура озер и водохранилищ	347
13.1. Методы выделения водных масс	350
13.2. Типы гидрологической структуры и взаимодействия водных масс ..	355
13.3. Сезонная смена водных масс в водоемах	359
<i>Контрольные вопросы:</i>	372
Заключение.....	374
Литература	375
Новые издания по дисциплине «Гидрология» и смежным дисциплинам.....	380
Предметный указатель	381

Предисловие

Дисциплина «Озероведение» впервые в России была включена профессором С. Д. Муравейским в программу подготовки специалистов-гидрологов на географическом факультете Московского университета одновременно с созданием им кафедры гидрологии. Он начал читать студентам такой курс лекций в 1944—1950 гг. и составил с участием Б. Б. Богословского учебное пособие «Очерки по озероведению» (Богословский Б. Б., Муравейский С. Д., 1955). В последующие годы продолжилось совершенствование лекционного курса, и было создано более полное пособие «Озероведение» (Богословский, 1960), которое используется до сих пор в отечественных вузах.

В 1970-е годы, когда накопился большой массив гидролого-гидрохимических и гидробиологических данных, рамки дисциплины расширились, и она получила название «Гидрология озер и водохранилищ». Автором была организована ежегодная 3—4-недельная учебная лимнологическая практика на Можайском водохранилище, на базе Красновидовской лаборатории водохранилищ (ныне учебно-научная база МГУ). Опубликованы методические указания «Лимнологическая практика» (1972) и расширенный их вариант (1989).

В основу этого учебного пособия положены конспекты лекций, читаемых автором более 40 лет студентам кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ. В нем излагаются не только классические¹, но и новые знания о гидрологии водохранилищ, суммированные в коллективной монографии «Вода России: водохранилища» (2001). В пособии отражены достижения лимнологов мира второй половины XX — начала XXI века в изучении динамики вод, термики и экосистем озер и техногенных водоемов от полярных до экваториальных широт, обобщенные в монографии Роберта Ветцеля².

Актуальность обучения будущих гидрологов основам лимнологии возрастает из-за непрерывного увеличения потребления воды населением и промышленным производством, все большего использования высококачественных водных, минеральных и рыбных ресурсов озер и водохранилищ. При этом обостряется проблема их охраны от истощения и загрязнения, требуются мероприятия по повышению устойчи-

¹ См. монографии: Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Л., 1955, 1960; Хатчинсон Д. Лимнология. М., 1969.

² Wetzel R. G. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. Academic Press, 2001.

ности водных экосистем и по управлению качеством воды и рыбопродуктивности, прогнозирование их изменения при разработке любых водохозяйственных проектов с учетом вероятных колебаний климата в различных регионах.

Учебное пособие соответствует программе дисциплины «Лимнология»¹. Основная задача дисциплины — дать студентам возможность **понять причины возникновения гидрологических процессов и их развитие**, особенности их проявления в водном, ледовотермическом, гидрохимическом и гидробиологическом режиме природных и техногенных водоемов суши. Закономерности возникновения этих процессов одни и те же во всех водоемах Земли, но формы их проявления различны из-за разных размеров и конфигурации озерных чаш и ложа водохранилищ, различий в структуре водообмена в водоемах бессточных, сточных и со стоком, регулируемым гидротехническими сооружениями. Поэтому в главе 1 даются общие географо-гидрографические понятия об изучаемых водных объектах, в главе 2 — их морфогенетические и морфометрические особенности, а в последующих главах — разнообразные лимнические процессы и их взаимодействие в гидрологических явлениях и биопродукционных процессах, происходящих в озерах и водохранилищах. Каждая глава завершается списком контрольных вопросов. Вторая задача — ознакомить учащихся с мировой лимнологической терминологией, без понимания которой невозможно расширять свои знания при чтении специальной литературы.

В нескольких разделах пособия мелким шрифтом приведены примеры процессов в крупнейших водоемах и их гидрографические особенности, лимнологические методы их изучения, не рассматриваемые в гидрометрии, примеры использования некоторых расчетных методик, чтобы облегчать студентам понимание наиболее сложных теоретических вопросов.

В предметном указателе даны научные термины, принятые в отечественной и зарубежной лимнологии, выделены номера страниц с определениями. В конце пособия к каждой главе дан список литературы, ссылки на него приведены в тексте пособия в круглых скобках. Ссылки на другие источники даны в подстраничных сносках.

В учебной программе кафедры гидрологии суши дисциплина «Лимнология» включает цикл лекций и практические работы, входящие в «Практикум по гидроэкологии озер и водохранилищ» (2004), а также студенты проходят летом лимнологическую практику на водоеме. Эта дисциплина изучается одновременно с тремя другими базовыми дисциплинами — «Гидрометрия», «Гидрология рек» и «Гидрохимия». На первом курсе изучается дисциплина «Гидрология» для студентов-географов всех специальностей. В ней имеются небольшие разделы «Гидроло-

¹ Учебно-методические материалы по направлению 021600 Гидрометеорология / под ред. Н. С. Касимова. М. : МАКС-Пресс, 2012. С. 173—186.

гия озер» и «Гидрология водохранилищ» (Михайлов, Добровольский, Добролюбов, 2005. С. 259—328). Подобные разделы имеются и в других учебниках¹.

В последующие годы студентам-гидрологам старших курсов предстоит изучать в дисциплинах «Гидрофизика», «Гидробиология и водная экология», «Использование и охрана водных ресурсов», «Водохозяйственные расчеты» и «Основы управления водными экосистемами» (2001) более глубоко прикладные аспекты лимнологии, применение математических моделей для диагноза и прогноза гидроэкологического режима водоемов суши (Лимнологическое моделирование, 1998), начальное представление о которых дается в этом пособии.

В результате изучения дисциплины «Лимнология» студент должен освоить:

трудовые действия

- владение знаниями о водоемах суши и их географическом распределении;
- навыками проведения гидролого-гидрохимических работ на озерах, водохранилищах и прудах;
- методами сбора справочной информации и методами простейших лимнологических расчетов;

необходимые умения

- использовать гидрологические и водохозяйственные справочные данные;
- выполнять задания гидроэкологического практикума, анализировать результаты и достоверность произведенных расчетов;

необходимые знания

- особенностей свойств воды в водоемах суши;
- местоположения крупнейших озер и водохранилищ России и мира;
- основных классификаций водоемов;
- методов измерения электропроводности, анализа химического состава воды, вычисления солёности и плотности воды, определения первичной продукции и деструкции органического вещества в водной экосистеме.

Автор благодарен сотрудникам А. В. Гончарову, Ю. С. Даценко, М. Б. Заславской, В. В. Пуклакову и рецензентам Н. И. Алексеевскому, Д. В. Козлову и Н. И. Коронкевичу за полезные советы, учтенные при редактировании пособия. Особенно признателен М. Г. Ершовой за сорокалетнее участие и помощь в преподавании и во время полевой учебной практики, в составлении, иллюстрировании и редактировании этого учебного пособия.

¹ См., например: Давыдов Л. К. Общая гидрология / Л. К. Давыдов, А. А. Дмитриева, Н. Г. Конкина. Л. : Гидрометеиздат, 1973. С. 336—409; Богословский Б. Б. Общая гидрология / Б. Б. Богословский, А. А. Самохин, К. Е. Иванов, Д. П. Соколов. Л. : Гидрометеиздат, 1984. С. 204—303; Догановский А. М. Гидросфера Земли / А. М. Догановский, В. Н. Малинин. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 477—542.

Глава 1

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

1.1. Водоемы суши и их природные ресурсы

Все водоемы гидросферы делят на океанические водоемы — океаны, моря и их части — и на водоемы суши.

Особенности континентальных водоемов и происходящих в них процессов

Водоем суши — это водный объект с замедленным водообменом в замкнутом углублении поверхности суши, водная масса которого не взаимодействует с водами Мирового океана. К водоемам суши относятся природные водоемы на материках и островах — озера, а также созданные людьми пруды и водохранилища — *природнотехногенные водоемы* (их нередко называют *техногенные*).

Каждый водоем — это не только скопление воды в понижении рельефа, но и место обитания разнообразных организмов: водных бактерий, растений и животных, рыб. Поэтому каждый водоем должен рассматриваться как экосистема.

Понятие *экосистема* появилось в природоведении сравнительно недавно — в 1935 г. Его ввел в науку А. Тенсли, специалист по растительным сообществам. Экосистемой он назвал «единый природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания, в которой живые и косные компоненты связаны между собой обменом веществ и энергии».

Водной экосистемой названа такая экосистема, в структуре и функционировании которой ведущая роль принадлежит воде — среде обитания водных организмов.

Науку, изучающую континентальные водоемы и их экосистемы, называют *лимнологией*¹. Лимнология (или *озероведение*) выделилась в отдельную отрасль физической географии и гидрологии потому, что водоемы суши имеют специфические особенности совокупности гидро-экологических процессов, которые их отличают и от морских водоемов

¹ С греческого *экос* — дом, жилище, *лимне* — пруд или водоем, *логос* — наука.

и от водотоков — рек и каналов. Их совокупность состоит из пяти групп важнейших процессов, свойственных каждому водоему суши:

1. **Динамика вод**, которая в водоемах, в отличие от рек, зависит в значительной степени от вертикального и горизонтального распределения плотности воды. В водных объектах с замедленным водообменом уклон водной поверхности в среднем в сотни раз меньше, чем в реках, поэтому и скорость течений измеряется не в метрах в секунду, а в сантиметрах в секунду. Вследствие ослабленной турбулентности течений в водоеме возникает различие плотности воды между ее слоями, называемое **стратификацией** (слоистостью) водной толщи. Поэтому в водоемах большую роль в перемешивании играет **конвекция** — явление, возникающее тогда, когда плотность воды верхнего слоя становится больше плотности подстилающего слоя. Тогда в расслонной толще появляются нисходящие и восходящие токи воды, приводящие к ее перемешиванию. Из-за больших размеров акваторий водоемов, в сравнении с речным руслом, на них в ветреную погоду возникают волнение и ветровые течения, еще более интенсифицирующие перемешивание воды в поверхностном слое, чего не наблюдается в водотоках. Таким образом, динамика вод в водоемах суши имеет большее сходство с морскими динамическими процессами, чем с речными потоками.

2. **Биологическая продуктивность** водоемов, т. е. способность их экосистемы из растворенных в воде минеральных веществ создавать органическое вещество в виде клеток живых **водных организмов**. Эта способность продуцировать органическое вещество сходна со свойствами почв, которые также характеризуются продуктивностью.

«Вода водоемов по всем своим свойствам принадлежит к телам типа почв, а не минералов. Вода — это почва в широком понимании этого слова» (Муравейский, 1960, с. 25). Средняя продуктивность водоемов всей суши составляет примерно 1,4 грамма органического вещества под 1 м² акватории за сутки. Эта интенсивность производства органического вещества втрое выше, чем в Мировом океане и сопоставима с продуктивностью сельскохозяйственных полевых культур, но вдвое меньше, чем в среднем для всей суши¹. В то же время в водоемах суши есть участки, заросшие высшей водной растительностью, продуктивность которых достигает 14 г/(м² · сутки). Это самая большая интенсивность продуцирования, в 1,5 раза большая, чем даже в экваториальных лесах.

Способность создавать органическое вещество и водоемные (**лимнофильные**) организмы имеет большое экологическое значение. Благодаря этому в водоемах суши возникают громадные биологические ресурсы, определяющие не только их рыбопродуктивность, но и способность водных экосистем к самоочищению от загрязняющих веществ, к формированию питьевых качеств воды. Процессы продуцирования органического вещества в озерах и водохранилищах намного более интенсивны, чем в реках, в которых образующаяся масса речных (**рео-**

¹ Рябчиков А. М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М. : Мысль, 1972.

фильных) организмов ничтожно мала в сравнении с массой лимнофильных организмов.

3. Аккумуляция веществ и энергии. Благодаря замедленности водообмена водоемные экосистемы — накопители вещества и энергии. Это — экологически очень важное их свойство. Во-первых, поглощение солнечной радиации при фотосинтезе органического вещества водными растениями обеспечивает энергией биологическую продуктивность и активную жизнедеятельность водных организмов, участвующих в утилизации **аллохтонных** (т. е. поступающих в водоем извне) загрязняющих веществ и способствующих тем самым самоочищению воды в водоемах. Во-вторых, в слабопроточных водоемах интенсифицируется осаждение (**седиментация**) взвешенных аллохтонных и **автохтонных** (образовавшихся в самом водоеме) веществ. Оно обеспечивает захоронение в донных отложениях загрязняющих воду веществ и формирование на дне разнообразных органических и минеральных озерных ресурсов. Вещество и энергия накапливаются и в океане, и в долинах рек. Но в морях, океанах и на затапливаемых в высокие половодья поймах речных долин эти процессы многократно менее интенсивны. Накопление осадков в озерах и водохранилищах ведет к уменьшению их глубины и сокращению продолжительности существования.

4. Воздействие стока с водосбора на внутриводоемные процессы. Все процессы формирования водного, термического, химического и биологического режима в водоемах суши, в отличие от океанов, зависят не только от их географического положения, но и от размера и природных условий их водосборов. Сток с водосбора определяет объем и состав речных водных масс, из которых образуется основная водная масса в озере или водохранилище. При этом важно, где расположен водосбор, каковы его размеры. Поэтому принято делить водоемы суши на два географических класса: **водоемы зональные** и **полизональные**. Зональный (или *интразональный*) — это такой водоем, водосбор которого расположен целиком в той же географической зоне, что и сам водный объект. Тогда можно считать, что гидроклиматические условия практически одни и те же на водоеме и на его водосборе. Если водосбор водоема находится в нескольких природных зонах или высотных поясах высокогорий, то водоем относят к полигональному классу. Влияние процессов формирования стока, происходящих на водосборах водоемов суши, на их экосистему настолько сильно, что в озероведении введено понятие «водосбор — водоем — единая система»¹. В свою очередь, в большинстве водоемов происходит сильнейшая трансформация водного режима питающей его реки (или рек) и состава речной воды. Поэтому вытекающие из озер реки называют озерными со сглаженными половодьем и паводками (или с полным их отсутствием) и полноводными руслами в меженные периоды.

¹ Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор — единая природная система. — Л. : Наука, 1979. — 195 с.

5. **Взаимодействие водных масс с озерной чашей и ложем водохранилища** проявляется в основных процессах как внешнего водо- и теплообмена, так и во внутриводоемных динамических, термических, химических и биологических процессах, в преобразовании берегов и дна каждого водоема. Роль этого взаимодействия в водоемах суши не меньше, чем в реках, где, как известно, поток формирует русло, а русло определяет структуру потока.

Общие понятия о гидроэкологической структуре водоемов

Каждая природная система обладает определенной структурой, то есть совокупностью взаимосвязанных компонентов.

Водная экосистема состоит из двух структур — вещественной и пространственной.

Абиотические компоненты вещественной структуры — это вода, растворенные в ней химические вещества, минеральные взвеси, первичные грунты, слагающие озерную котловину (скальные, глинистые) или ложе водохранилища, озерные залежи различных солей.

Биотические компоненты — разнообразные водные организмы от бактерий до рыб и *макрофитов* (высшие водные растения), вся совокупность которых называется *биотой*, а также гниlostные и торфянистые илы, ракушечники.

Пространственная структура водоема состоит из генетически и качественно различных **водных масс** с разным набором вещественных компонентов, который определяется происхождением водной массы. Компонентами пространственной структуры служат и фронтальные зоны, находящиеся между водными массами, и разноплотностные слои водной толщи — поверхностный (*эпилимнион*), промежуточный (*металимнион*) и глубинный (*гиполимнион*), и различные **биотопы** (места обитания различных организмов, населяющих донные отложения и водную толщу). Пространственная структура в одних водоемах более сложная, в других — относительно простая. Это зависит от происхождения, размеров и формы водоема, использования его природных ресурсов.

Совокупность вещественной и пространственной структур и есть **гидроэкологическая структура водоема**. Взаимодействие компонентов этой структуры между собой происходит вследствие постоянного действия в водоеме силы тяжести, циклических колебаний поглощаемой им солнечной энергии и энергии ветра, а также изменяющегося притока воды с водосбора. Все процессы взаимодействия абиотических компонент с биотическими подчинены режиму прихода солнечной радиации на акваторию водоема и режиму стока в него водных масс с водосбора. Суточные, синоптические, сезонные, многолетние и вековые циклы колебаний этих внешних энергетических воздействий изменяются от одной гидроклиматической эпохи к другой и определяют исключительно большую пространственно-временную изменчивость гидроэкологического состояния водоемов суши, районов и участков

их акваторий, слоев водной толщи. Поглощенная водоемом энергия преобразуется в нем в изменчивость температуры, плотности воды, течений, в колебания уровня воды и интенсивности волнения, перемешивания, продуцирования и деструкции органических веществ. Это ведет к изменению концентрации растворенных газов, ионов, биогенных веществ и других характеристик химического состава воды, видового состава, численности и биомассы организмов биоты, показателей качества воды и рыбопродуктивности водоема.

Гидроэкологическая структура каждого водоема по-разному сложна, по-разному формируется и преобразуется в период его существования, каждый водоем имеет индивидуальные особенности гидрологического режима и экологического состояния биоты. Поэтому их трудно бывает сравнивать, и найти в природе два одинаковых водоема практически невозможно. Озероведами много внимания уделяется классификации озер. Создано большое число частных классификаций водоемов суши (Китаев, 2007), учитывающих разнообразие тех или иных структурных компонент или процессов их взаимодействия. Однако неоднократные попытки получить единую, комплексную классификацию озер или водохранилищ до сих пор не увенчались успехом и общим признанием. Тем не менее, детально изучая функционирование экосистем в наиболее представительных водоемах того или иного класса, удастся познать наиболее общие закономерности процессов внешнего энерго- и массообмена экосистемы водоемов и внутриводоемного взаимодействия ее структурных компонентов. Это важно для оценки экологического состояния других, еще не изученных в гидроэкологическом отношении озер и водохранилищ, для прогнозирования изменения водоема под воздействием разнообразных видов использования его природных ресурсов и преобразования ландшафтов его водосбора.

Стадии развития озерных экосистем

Продолжительность существования водоемов суши различна — от десятков миллионов до десятков лет, а иногда — и меньше. Древнейшие озера — глубочайшие среди озер суши Байкал и Танганьика, возраст которых оценивается в 20—25 млн лет. Крупнейшему озеру Земли — Каспию, пережившему 87 эпохальных гидроклиматических циклов, — около 6,5 млн лет, за которые наибольший размах колебания его уровня составил 200 м. Многие озера, имеющие возраст, соизмеримый с длительностью гидроклиматических циклов, проходят, по мнению ряда лимнологов, несколько стадий в эволюционном развитии своей экосистемы.

При своем возникновении озеро наиболее глубоко, гипolimнион может быть многократно толще эпимимниона, который малопродуктивен, поэтому вода в нем прозрачна. Эта стадия «озерной юности» именуется *олиготрофией*. По мере переработки гидродинамическими процессами берегов озерной чаши и накопления в ней донных отложений водоем мелеет. Увеличивается в нем продуктивность биоты вслед-

ствие добавления к аллохтонным биогенным веществам все большего количества автохтонных — продуктов деструкции накапливающегося в озерной воде и илах органического вещества. И озеро постепенно переходит сначала в промежуточную стадию — *мезотрофию*, характеризующуюся умеренным развитием продукционно-деструкционных процессов. А затем, из-за убыстряющегося заиления и накопления в экосистеме уже преимущественно автохтонных органических и биогенных веществ, вступает в стадию «озерной зрелости» (*эвтрофию*)¹. По мере заиления чаши уровень воды в котловине повышается, возрастает расход воды в истоке озерной реки, усиливается размыв ее русла, что, в конечном счете, приводит к спуску воды из котловины, превращающуюся в дренированную речной сетью озерную равнину. Так исчезло, по-видимому, когда-то приледниковое озеро в Молого-Шекснинской низине, спущенное Волгой и ее притоком Шексной², а в 40-х годах XX века частично восстановленное в виде Рыбинского водохранилища.

Третья стадия медленного *природного эвтрофирования* озерной экосистемы может быть и иной. Если с заболоченного водосбора в неглубокое олиготрофное озеро поступает мало биогенных и легко окисляемых водными организмами органических веществ, и оно зарастает макрофитами, в нем накапливаются органические кислоты и трудно окисляемые бактериями остатки макрофитов. В таком водоеме возникает стадия «озерной старости» — *дистрофия* озерной экосистемы, которая ведет к постепенному заболачиванию сначала озерной чаши, а затем — и окружающих ее пологих склонов котловины. Так озеро постепенно превращается в болото.

Эволюционное развитие экосистемы водоема многократно ускоряется тогда, когда в него или его притоки сбрасываются сточные воды, обогащенные минеральными биогенными и органическими веществами. Это так называемое *антропогенное эвтрофирование* может привести эвтрофную, наиболее продуктивную, экосистему к *гипертрофии*. Эта стадия характеризуется избыточным накоплением в водоеме органических веществ, исчезновением растворенного в воде кислорода и ценных пород рыбы, появлением такого цвета, привкуса и запаха, которые делают воду непригодной для питья.

Продолжительность каждой стадии эволюционного изменения экологического состояния одного и того же озера может быть существенно различна, как и одной и той же стадии у озер, расположенных в разных природных зонах или имеющих различные глубины и размеры водосбора и акватории, или разную интенсивность водообмена. Кроме того, на скорость эволюции сильно влияет *устойчивость экосистемы*, т. е. ее способность противостоять внешним воздействиям, которые нару-

¹ Три термина трофической классификации озер введены в лимнологию Августом Ф. Тинеманом (1882—1960): Thienemann A. Seetypen // Naturwissenschaften. — 1921. — Bd. 18. — S. 1—3.

² Спиридонов А. И., Спиридонова Н. А. К геоморфологии Молого-Шекснинской низины // Вести. Моск. ун-та. Сер. физ.-мат. и естеств. наук. — 1952. — № 2.

шают гидроэкологическую структуру и нормальное функционирование абиотической либо биотической ее частей и всей экосистемы в целом¹. Устойчивость водной экосистемы тесно связана с ее **уязвимостью**, определяемой степенью зависимости водной экосистемы от внешних воздействий (природных или антропогенных), которые могут привести к нарушению ее структуры и функционирования, т. е. к потере устойчивости. Уязвимость озер, особенно в стадии олиготрофии, существенно большая, чем речных и морских экосистем.

При смене гидроклиматических эпох внешние условия развития процессов в озерах могут измениться настолько, что устойчивость водной экосистемы преодолевается, и ее эволюционное развитие прерывается. Так, при резком похолодании климата и увеличении притока воды в озерную котловину возможны сильный подъем уровня воды в ней и омоложение экосистемы вплоть до олиготрофии. После чего начинается повторно эволюционный процесс старения озерной экосистемы по мере заполнения чаши озера новыми донными отложениями (см. раздел 10.5).

Природные ресурсы водоемов

Важнейшая особенность природных ресурсов водоемов суши заключается в том, что они — **ежегодно возобновляемые**, конечно, при условии соблюдения правил их рационального использования, разработанных в результате комплексного изучения функционирования абиотической и биотической частей их экосистемы.

Природные ресурсы озер и водохранилищ состоят из водных ресурсов, которые очень широко используются, в первую очередь, как источник питьевой и технологической воды в коммунальном хозяйстве, в большинстве промышленных производств, в качестве водоемов-охладителей ТЭС и АЭС, для ирригации в засушливых регионах. **Статические** водные ресурсы водоемов суши, т. е. суммарный запас воды в них, оцениваются в 180 тыс. км³ (эта величина в 7777 раз меньше объема воды в Мировом океане).

Объем водных ресурсов состоит на 43 % из солоноватой воды Каспия; пресной воды озер (50 %), в том числе — Байкала (13 %), Великих озер Северной Америки (12 %), Танганьики (10 %) и остальных пресных озер (15 %); вод соленых озер (3 %) и пресной воды созданных в XX веке водохранилищ (4 %).

От объема водных ресурсов водоемов суши зависит величина других четырех видов их ресурсов:

— **биологические ресурсы** водоемов оцениваются *биомассой*, т. е. количеством органического вещества в растительных и животных организмах, жизнедеятельность которых играет важную роль в самоочищении воды от загрязняющих веществ. Кроме этого, биологические

¹ Михайлов В. Н., Эдельштейн К. К. Оценка устойчивости и уязвимости водных экосистем с позиций гидроэкологии // Вести. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 1996. — № 3. — С. 27—34.

ресурсы служат *кормовыми ресурсами*, определяющими рыбопродуктивность водоемов;

— **минеральные ресурсы** донных отложений пресных (озерный мел, руда) и соленых озер (поваренная соль, разнообразные минералы для химической и фармацевтической промышленности);

— **гидроэнергетические ресурсы** водохранилищ и озер (превращенных в озерные водохранилища), используемые в энергетических сетях для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией в часы пиковых нагрузок и в аварийных ситуациях;

— **рекреационные и бальнеологические ресурсы**, которые по мере увеличения населения суши и повышения уровня его благосостояния становятся все более ценными для отдыха и санаторно-курортного лечения различных заболеваний озерными лечебными грязями.

Современная методология изучения озер и водохранилищ

В основу изучения гидроэкологического режима водоемов суши в России положено сочетание стационарных регулярных наблюдений региональными подразделениями Росгидромета и преимущественно экспедиционных исследований ряда научных учреждений Российской академии наук (РАН), университетов и рыбохозяйственных организаций.

Стационарные гидрометеорологические наблюдения ведутся на озерных водомерных постах ежесуточно и периодически на рейдовых вертикалях: измерения гидрофизических характеристик от поверхности водоема до дна сопровождаются отбором проб для анализа мутности, химического состава и других показателей качества воды. В период ледостава ежедекадно проводятся снегомерные и ледомерные наблюдения. На ряде водохранилищ выполняются ежегодные инженерно-геологические наблюдения за переработкой размываемых участков берега, формированием береговой отмели и других форм рельефа мелководий, а также гидрологические наблюдения проектными институтами на вновь созданных водохранилищах с целью оценки оправданности прогнозов, использованных в проекте, и дальнейшего совершенствования проектных разработок.

Экспедиционные исследования (гидрометеорологические, гидрохимические, гидробиологические, ихтиологические) проводятся с научно-исследовательских судов обычно в виде съемки акватории водоема по заранее спланированной сетке станций вертикального зондирования водной толщи или разрезов, сопровождающегося отбором проб воды. Иногда организуются *комплексные съемки* (гидроэкологические) водоема или его отдельного района, в которых, кроме гидролого-гидрохимических наблюдений, проводятся еще и гидробиологические наблюдения. Съемки водоема позволяют выявить пространственную структуру его экосистемы и ее изменение в промежуток времени между одной гидрологической или комплексной съемкой водоема и аналогичной другой съемкой в иную фазу внутригодового режима или при иной синоптической ситуации.

Реже проводятся экспедиционные работы, направленные на исследование ансамбля внутриводоемных процессов. Одни из них ведутся на многосуточной станции с учащенными наблюдениями (с часовыми интервалами между зондированием водной толщи). Еще реже удается организовать с этой целью комплексные исследования на полигоне, состоящем из сгущенной сетки станций в том или ином участке акватории водоема. Особый вид экспедиционных исследований — *грунтовые съемки*, сопровождающиеся определением толщины слоя донных отложений и отбором проб грунта для определения его физических свойств, химического состава, а иногда и состава бентоса, проводящиеся раз в десятилетие и реже.

Результаты стационарных наблюдений и экспедиционных исследований водоема накапливаются в гидроэкологическом банке данных и используются для изучения взаимосвязи изменчивости количественных характеристик отдельных компонентов экосистемы или их комбинаций с другими абиотическими или биотическими характеристиками. Это требуется для того, чтобы выявить закономерности процессов взаимосвязи между компонентами экосистемы и получить количественные оценки, характеризующие функционирование биоты в различные фазы гидрометеорологического режима водной среды, при изменении погодных условий, режима стока речных водных масс в водоем и их трансформации в озере или в водохранилище.

Такие обобщения способствуют развитию теоретической лимнологии и используются для разработки алгоритма разнообразных *математических моделей водоема*, описывающих отдельные внутриводоемные процессы, тепломассообмен водоема с атмосферой и донными грунтами, трансформацию водоемом речного стока. Модель, по алгоритму которой производятся компьютерные расчеты, должна пройти *верификацию*, т. е. результаты выполненных по ней расчетов важно сопоставить с данными проведенных ранее соответствующих наблюдений и получить качественную (и, желательно, количественную) оценку погрешности моделирования процессов и режима характеристик гидроэкологического состояния водоема или его изменения за расчетный период. Если ошибки признаются допустимыми, модель может использоваться для водоемов того или иного класса после ее адаптации к конкретному водному объекту. *Адаптация модели* включает введение в нее параметров моделируемого водоема, необходимой информации местных пунктов стационарных наблюдений сети Росгидромета и совокупности характеристик гидроэкологического состояния экосистемы водоема (по данным наблюдений), исходное в начальный момент расчетного периода. Лишь верифицированная и адаптированная модель водоема может использоваться для диагностических и прогностических лимнологических расчетов.

Диагноз режима водоема представляет собой воспроизведение модельным расчетом развития разнообразных внутриводоемных процессов в течение расчетного периода с заданным интервалом (суточным

или даже часовым). Это, по сути, — физически и экологически обоснованная нелинейная интерполяция пространственно-временных колебаний всей совокупности включенных в модель характеристик состояния экосистемы между двумя или несколькими гидроэкологическими съемками водоема или зондированиями водной толщи на рейдовой вертикали. Результаты диагноза позволяют:

1) получить значения характеристик, измерение которых затруднительно организовать или даже невозможно по техническим причинам, например, в штормовую погоду, в периоды несплошного и ненадежного ледового покрова;

2) существенно уточнить вычисление осредненных значений лимнологических характеристик за любой промежуток времени: составляющих водного, теплового и солевого балансов водоема или его частей, баланса других растворенных и взвешенных в воде веществ для определения количественных показателей темпа накопления в водоеме биологических и минеральных ресурсов;

3) сформулировать новые задачи по улучшению методов наблюдений при научных исследованиях и мониторинге гидроэкологического состояния водоема с одновременным сокращением числа стандартных наблюдений (т. е. ежегодно проводимых) на рейдовых станциях и в экспедиционных съемках водоема ради постановки целенаправленных исследований наименее изученных процессов, выявленных при верификации модельных расчетов на данном водоеме.

Прогностические расчеты по моделям выполняются:

1) для оценки вероятного изменения функционирования экосистемы или изменения наблюдаемых колебаний отдельных лимнологических характеристик при различных сценариях изменения климата, хозяйственного освоения берегов, акватории и водосбора водоема, при разработке рекомендаций по увеличению устойчивости экосистемы к новым антропогенным нагрузкам либо при выборе и обосновании оптимальных водоохранных мероприятий для снижения имеющейся нагрузки;

2) для оценки гидроэкологического режима проектируемого водохранилища и отдельных его районов (участков) в годы различной водности на основе проектного водохозяйственного баланса водоема. Такую оценку нередко называют *лимнологическим локальным прогнозом* режима водохранилища, в отличие от «*фонового прогноза*», в котором характеристики гидроэкологического состояния ранее приводились в виде средних значений для всей акватории в средневодный год или для его сезонов;

3) для разработки прогнозов предстоящего изменения гидроэкологического состояния водоема на основе климатических моделей и модельных расчетов притока водных масс с водосбора. Совершенствование метеорологических и лимнологических модельных расчетов позволит перейти к оперативным прогнозам, ежедневно уточняемым для оптимизации управления водным режимом и качеством воды

в водохранилищах — источниках централизованного водоснабжения, для водного транспорта — к прогнозам волнения в предстоящую штормовую погоду, сроков замерзания и вскрытия отдельных районов и всего водоема в целом.

В экспедиционных исследованиях водоемов суши в прошедший полувековой период гидрологи начали широко использовать электронные приборы для зондирования водной толщи на станциях и при выполнении разрезов в гидролого-гидрохимических съемках — это практически непрерывная регистрации характеристик *in situ* (т. е. в водоеме) по вертикали либо по маршруту судна. Значения температуры и электропроводности воды регистрируются *термокондуктометрами*, температура и содержание кислорода в воде — *оксиметрами*. По электропроводности с учетом температуры воды рассчитываются минерализация и плотность воды. В этот же период многие водомерные посты были оборудованы самописцами уровня воды, начали применяться волномерные установки и АБС (автономные буйковые станции) с автоматической регистрацией высоты и периода ветровых волн, скорости и направления течений, эхолоты, судовые автоматические метеостанции. Получил широкое распространение кислородный метод определения среднесуточной интенсивности продукционно-деструкционных процессов на различных горизонтах водной толщи. В последние два десятилетия стал повсеместно применяться на водоемах метод спутникового географического позиционирования (GPS) станций и разрезов.

Перечисленные современные методы лимнологических полевых исследований в сочетании с разнообразными компьютерными программами статистической и картографической обработки больших массивов информации вывели лимнологию, как и океанологию, на качественно новый уровень познания процессов пространственно-временной изменчивости внутриводоемных процессов, их теснейшей взаимосвязи с термодинамикой приземного слоя тропосферы. Кроме этих, наиболее распространенных видов исследований, делаются многочисленные попытки использовать аэрокосмические методы для изучения гидроэкологического режима озер и водохранилищ и их экологического мониторинга.

Краткие сведения из истории лимнологии

Лимнология (озероведение) как одно из направлений географии и гидрологии суши возникло в 1885 г. на V Международном географическом конгрессе в Лондоне, где Франсуа Форель (1841—1912), швейцарский лимнолог и иностранный член-корреспондент Российского географического общества, многие годы изучавший озеро Леман (Женевское), сделал доклад, в котором сформулировал задачи комплексного изучения озер¹. Его доклад был поддержан Дмитрием Нико-

¹ Фортунатов М. А. О содержании, задачах и развитии балансового и ландшафтного направлений в лимнологии // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. — М. : Наука, 1967. — С. 14—21.

лаевичем Анучиным (1843—1923), профессором Московского университета, организовавшим первую комплексную экспедицию на озера в истоках Волги, Западной Двины и Днепра (1894 г.) и обобщившим накопленные лимнологические знания¹.

В 1886 г. Ф. Форель опубликовал инструкцию и программу для систематического изучения озер, а в 1901 г. — обстоятельное руководство по лимнологии². В предшествующий период экспедициями обследовались отдельные озера и составлялись их гидрографические описания, на некоторых из них в ряде стран начались водомерные наблюдения, в том числе — в России: на Ладожском озере (1724 г.), Каспии (1830 г.), Селигере (1847 г.), Ильмене (1881 г.).

Первая инструкция по водомерным наблюдениям появилась в нашей стране в 1858 г. В конце XIX в. стали проводиться экспедиционные исследования крупных озер, результаты которых изложены в монографиях³. Масштабные полевые исследования были выполнены на карельских озерах в 1920—1924 гг. Олонецкой экспедицией Российского гидрологического института, учрежденного в 1919 г. (ныне — ГГИ — Государственный гидрологический институт в Санкт-Петербурге). Одним из его организаторов и руководителем экспедиции (состав ее двух партий достигал 72 человек) был Г. Ю. Верещагин (1889—1944). В 1928 г. он создал Байкальскую лимнологическую лабораторию в пос. Лиственное. Ныне — это база Лимнологического института СО РАН, находящегося в Иркутске и опубликовавшего атлас «Байкал» (1993).

Первые лимнологические лаборатории для комплексного стационарного гидроэкологического изучения внутриводоемных процессов были организованы на небольших озерах:

— в 1888 г. — Косинская на оз. Белое под Москвой, почти 50 лет руководителем которой был профессор Л. Л. Россолимо;

— в 1890 г. — Пленская в Северной Германии (ныне это — крупный Лимнологический институт Общества имени Макса Планка);

— в 1891 г. — Глубокоозерская на оз. Глубокое в истоке р. Малая Истра под г. Звенигородом. Ее директором стал профессор биологического факультета Московского университета, один из основоположников гидробиологии С. А. Зернов. В этой лаборатории начинали свои научные исследования основатель кафедры гидрологии суши на географическом факультете МГУ профессор С. Д. Муравейский, гидрохимик и микробиолог С. И. Кузнецов, ихтиолог Г. С. Карзинкин, гидролог Б. Б. Богословский, гидробиологи Г. Г. Винберг, Б. С. Грезе, К. А. Воскресенский, гидрохимик Ф. И. Безлер, возглавившие затем отдельные направления отечественной лимнологии. В 1948—1956 гг. на берегу

¹ Анучин Д. Н. Воды суши. Озера // Землеведение. Т. III. Кн. 2 (Приложение). М., 1896.

² Форель Ф. Руководство по озероведению / пер. с нем. И. Д. Кузнецова. — СПб., 1912.

³ Андреев А. П. Ладожское озеро. — СПб., 1982; Берг Л. С. Аральское море. Опыт физико-географической монографии // Изв. Туркест. отд. РГО. Т. V. Вып. IX, 1908.

озера работала метеорологическая станция под руководством Л. Л. Россолимо, одновременно исследовавшего в озере слоистость донных отложений. И до сих пор эта лаборатория служит базой комплексных полевых лимнологических исследований, являясь подразделением Института проблем экологии и эволюции РАН;

— в 1896 г. Бородинская пресноводная биологическая станция на оз. Бологовское, переведенная в 1908 г. на оз. Селигер¹, где, наряду с водными организмами, изучался и температурный режим водной толщи, влияние ветрового перемешивания на положение слоя скачка;

— в 1931 г. Карельская научно-исследовательская рыбохозяйственная лаборатория в Петрозаводске, превратившаяся в Институт водных проблем Севера РАН, многие годы ведущий комплексные исследования Онежского озера и многочисленных озер Севера ЕТР, опубликовавший серию монографий о внутриводоемных процессах и гидроэкологическом режиме озер, детальнейший «Каталог озер Карелии» (2001) и атлас «Онежское озеро» (2010);

— в 1949 г. сформировалась Лаборатория озероведения АН СССР в Ленинграде, преобразованная в 1971 г. в Институт озероведения РАН. Им опубликованы две многотомные серии монографий: 1) палеолимнологическая — об истории озер России и 2) отражающая отдельные этапы изучения Ладожского озера и экологическое состояние озер в отдельных регионах страны. Важнейшие результаты многолетних наблюдений обобщены в атласе «Ладожское озеро» (2002). Оба института располагают базами на небольших озерах — Венчурском и Красном (Пунус-Ярве), где круглогодично детально изучаются лимнические процессы.

В 1871 г. начал исследования озер США лимнолог Эдуард Бердж (1851—1950), основоположник балансового направления в лимнологии, опубликовавший в «Трудах Висконсинской академии наук» в 1915 г. исследования о тепловом балансе американских и европейских озер, а в 1916 г. — о роли ветра в прогреве озера. Первым гидрографическим обобщением лимнологических работ стала монография Хальбфасса «Озера Земли» (1922). В том же году по инициативе Августа Тинемана и Эйнара Наумана в г. Киль, недалеко от Пленской лаборатории, состоялся учредительный съезд Международной ассоциации теоретической и прикладной лимнологии (*SIL — Societies Internationals Limnology*), в котором участвовало более 80 ученых из 13 стран, в том числе 5 — из РСФСР. Этот съезд стал считаться Первым Конгрессом *SIL*. До сих пор действующая ассоциация играет важную роль в обмене научной информацией и развитии теоретической лимнологии, публикует статьи в своем международном журнале и созывает регулярно конгрессы в различных странах (Конгрессы III — в 1925 г. — и XVIII — в 1971 г. — проходили в СССР).

¹ Бородин И. Бородинская биологическая станция // Тр. Пресноводной биол. ст. — 1912. — Т. 3. — С. 1—19.

Во второй половине XX в. в мире насчитывалось, по данным ЮНЕСКО, более 300 лимнологических институтов и научных лабораторий, в том числе 65 — в СССР, 74 — в США, 11 — в Канаде. Были созданы крупные монографии, посвященные обобщению теоретических исследований лимнических процессов и классификациям водоемов суши: Д. Хатчинсон «Трактат о лимнологии» (1957) в трех томах, частично переведен на русский язык под редакцией Л. Л. Россолимо (Хатчинсон, 1969), Ф. Рутинер «Основы лимнологии» (1952), П. Велч «Лимнология» (1952), Б. Д. Зайков «Очерки по озероведению» в двух томах (Зайков, 1955, 1960), Р. Ветцель «Лимнология. Экосистемы рек и озер» (2001), С. П. Китаев «Лимнология для гидробиологов и ихтиологов» (2007), энциклопедия «Реки и озера мира» (2012), Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Springer (2012).

Задачи лимнологии расширились в связи с проектированием и началом эксплуатации многочисленных водохранилищ во многих странах и, в особенности, в СССР. Гидрометеослужбой созданы гидрометеорологические обсерватории (ГМО) на крупнейших водохранилищах и озерах. Они осуществляют руководство наблюдениями на водомерных постах и прибрежных метеостанциях, проведение периодических рейдовых наблюдений на гидрологических станциях в характерных плесах водоемов. В обсерваториях производится обобщение этих данных и разрабатываются методы расчета отдельных характеристик водного, термического и динамического режима водоемов, выполняются расчеты месячных и годовых водных балансов, решаются и другие научно-производственные задачи, возникающие при управлении водным режимом водохранилищ и их каскадов. Координация работы обсерваторий и методическая им помощь поручена Отделу озер и водохранилищ ГГИ и Государственному гидрохимическому институту (ГХИ), курирующему наблюдения за составом воды и ее лабораторный анализ.

Чтобы восполнить пробел в комплексном изучении экосистем водохранилищ Академия наук СССР поручила контр-адмиралу, д. г. н. И. Д. Папанину — руководителю ее флота научно-исследовательских судов, преобразовать небольшую биостанцию в Борке Ярославском на берегу Рыбинского водохранилища в Институт биологии водохранилищ. Ныне это — Институт биологии внутренних вод (ИБВВ РАН), а его филиал в г. Тольятти на берегу Куйбышевского водохранилища превратился в Институт экологии волжского бассейна (ИЭВБ РАН). В них, кроме гидробиологических лабораторий, имеются гидролого-гидрохимические, микробиологические, ихтиологические и др. лаборатории. Результаты их исследований публикуются в регулярно издающихся трудах институтов и монографиях. Кроме академических институтов, комплексные исследования водохранилищ ведутся Московским, Пермским и другими университетами, имеющими учебно-научные базы для практик студентов-гидрологов.

Для обсуждения результатов исследований отечественных рек, озер и водохранилищ созываются гидрологические съезды (I — 1924, II —

1928, III — 1957, IV — 1973, V — 1986, VI — 2004 и VII — 2013 гг.) и конференции, организуемые ГГИ, ГХИ, перечисленными академическими институтами, Московским и Пермским университетами, публикуются труды этих научных форумов.

В 1980-е годы под эгидой ЮНЕСКО и ЮНЕП организована еще одна международная организация — *International Lake Environment Committee (ILEC)*. Она периодически проводит международные школы-лектории по отдельным лимнологическим проблемам, издала в 1988—1993 гг. в Японии пятитомный справочник по гидроэкологии 218 наиболее изученных озер и водохранилищ мира (*Data Book of World Lake Environments...*).

Продолжается уточнение числа водоемов мира. Обработка крупномасштабных карт и дистанционных снимков поверхности суши показала, что существует более 300 млн природных и техногенных водоемов (Реки и озера мира, 2012), общей площадью свыше 4 млн км² (табл. 1.1)¹.

Таблица 1.1

Количество и суммарная площадь водоемов на суше

Площадь, км ²		Число водоемов	Средний размер, км ²	Суммарная площадь, км ²
от	до			
0,001	0,01	277 400 000	0,0025	692 600
0,01	0,1	24 120 000	0,025	602 100
0,1	1	2 097 000	0,25	523 400
1	10	182 300	2,5	455 100
10	100	15 905	24,7	392 362
100	1000	1 330	248	329 816
1000	10 000	105	2456	257 856
10 000	100 000	16	37 978	607 650
> 100 000	Каспий	1	378 119	378 119
Всего		304 000 000	0,012	4 200 000

В Институте озероведения РАН под руководством С. В. Рянжина создана компьютерная база данных WORLDLAKE. В ее основе — анализ более 5 тыс. лимнологических публикаций в последние 50 лет. В ее каталог по лимнологически изученным водоемам мира включены более 46 тыс. озер и 7,4 тыс. водохранилищ в 157 странах². Он содержит название водоема, его географические координаты и высоту над уровнем моря, климатические и морфометрические данные, данные по водному, термическому, кислородному режиму, составу биоты, а также перечень опубликованных работ о водном объекте.

¹ Downing J. A. [et al.] The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments // *Limnology and Oceanography*. — 2006. — 51.

² Рянжин С. В. Много ли на Земле озер? // *Природа*. — 2005. — № 4. — С. 18—25.

1.2. Озера и озерность территорий

Озеро — это природный водоем суши в котловине, постоянно или периодически наполненной до некоторого уровня водой. Слово «озеро» появилось в русской речи, по-видимому, очень давно, потому что в большинстве славянских языков используется тот же корень в различной транскрипции. Вероятно, происхождение этого слова связано со словами «обозреть», «взор», «зеркало», а на севере есть даже поговорка: «Озера — глаза Земли». Озера, как и реки, распространены на Земле повсеместно, за исключением некоторых безводных пустынь.

Котловина и чаша озера, его водосбор

Озерная котловина включает **чашу озера**, расположенную под его водной поверхностью, и расположенные выше склоны котловины. С них рассредоточенный поверхностно-склоновый сток поступает к **урезу**, служащему границей между водосбором и чашей. Урез оконтуривает **акваторию** озера. Площадь акватории озера включает его водную поверхность (в обыденной речи — «водное зеркало») и острова на озере.

По очертаниям чаши озера очень разнообразны — одни из них круглые, другие продолговатые, серповидные или сложной формы с извилистой береговой линией. При сильно извилистой береговой линии в озере выделяют плесы, заливы, бухты, губы. Эти части озерной акватории иногда отделены от основной части (главного плеса) одним или несколькими островами или полуостровами с проливами между ними. **Плес** озера (иногда говорят «плесо») — одна или несколько обособленных крупных частей акватории, нередко — с неодинаковым гидроэкологическим режимом.

Например, Западный и Восточный плесы Балхаша, соединяющиеся проливом Узун-Арал; Штанная и Липовая *курьи* (так на Южном Урале называют озерный плес) в оз. Большое Миассово; Березовский, Городской, Весецкий и другие плесы в Селигере.

Залив («губа» в Карелии) — крупная часть озерного плеса, вдающаяся в сушу и открытая для водообмена с остальной частью плеса. **Бухта** («лахта» — в Карелии) — небольшая часть акватории залива или плеса, закрытая от развивающегося в них волнения полуостровами или островами. **Островистость** озера, т. е. доля суммарной площади всех островов в площади его акватории, достигает, например, на Ковдозере (север Карелии) 19 %. Водоем в котловине с несколькими плесами или крупными заливами называют многолопастным озером.

Наиболее распространено деление чаши озер на литораль, сублитораль, пелагиаль и профундаль (рис. 1.1), которые считаются элементами экологической зональности водоема¹. Кроме того, экологами

¹ Экологический энциклопедический словарь. — М. : Ноосфера, 1999. — 930 с.

выделяются слои двух граничных поверхностей: **нейсталь** — вода-атмосфера и **бенталь** — вода-грунт (Константинов, 1986).

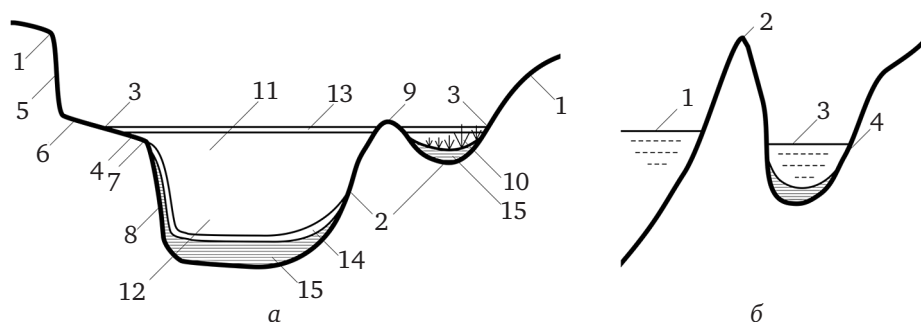


Рис. 1.1. Озерная котловина:

- а* — разрез озера (1 — поверхность котловины; 2 — поверхность чаши; 3 — урез; 4 — литораль открытая; 5 — клиф; 6 — пляж; 7 — подводная отмель; 8 — сублитораль; 9 — остров; 10 — закрытая литораль; 11 — пелагиаль; 12 — профундаль; 13 — нейсталь; 14 — бенталь; 15 — донные отложения);
- б* — озерная чаша в криптодепрессии (1 — уровень Мирового океана; 2 — водораздел; 3 — уровень озера; 4 — озерная котловина)

Литораль (от лат. *litoralis* — береговой) — это мелководная прибрежная зона, в которой солнечный свет и волновое перемешивание воды достигают дна¹. По морфологическим признакам **открытая литораль** (для воздействия ветра со стороны акватории плеса или крупного залива) делится на две подзоны:

— **абразионную отмель** (пляж), периодически заливаемую водой полностью или частично, сложенную гравием, талькой с валунами и преимущественно крупнозернистым песком или глинистыми и щебнистыми микротеррасами и

— **аккумулятивную отмель**, формирующуюся перемытыми волнением продуктами размыва склона котловины при формировании **клифа** (от англ. *clif* — береговой обрыв). Она сложена песком, преобладающий размер частиц которого уменьшается с глубиной. **Закрытая литораль**, защищенная от штормового волнения мелью или островом, обычно зарастает **макрофитами**, в приурезовой полосе — **надводной** (воздушно-водной) жесткой растительностью, дальше от берега до глубины 2—3 м — преимущественно **полупогруженными** растениями с плавающими листьями, на еще больших глубинах — **погруженными**, т. е. мягкой растительностью **фитобентоса**.

В малых лесных озерах (в Карелии они зовутся «ламба») нередко от берега распространяется по водной поверхности растущая наплаву масса живых и отмерших макрофитов — **сплавина** («зыбун»), иногда даже с покровом сфагнового мха, кустиками клюквы и багульника, карликовой березой. Под спавиной могут быть достаточно глубокая вода или жидкий ил. Экосистема таких заболачивающихся озер дистрофия, они заиливаются и зарастают, превращаясь в торфяные болота. В защи-

щенных участках литорали более крупных озер из массы отмерших макрофитов формируются берега биогенного типа.

Сублитораль или *деклираль, отсыпь* — это откос подводной отмели, в глубоких озерах переходящий в заиленную часть озерной чаши.

Пелагиаль (от греч. *pelagos* — море) — часть озерной акватории за пределами прибрежной зоны. В крупнейших озерах ее иногда подразделяют на районы, в крупных и даже небольших морфологически сложных озерах — на плесы.

Профундаль (от лат. *profundes* — глубокий) — глубинная толща воды в пелагиали, куда не проникают волнение и свет, она иногда разделена на отдельные части высокими поднятиями (порогами) донного рельефа котловины.

Озерные котловины, дно которых глубже, чем уровень Мирового океана, называются **криптодепрессиями** (рис. 1 б).

Глубочайшие озера в криптодепрессиях: Байкал — отметка дна относительно уровня океана в точке максимальной глубины 1637 м составляет 1180 м, Каспий — при глубине до 1025 м отметка дна — 1053 м (Каспийское море, 1986), Мертвое море — при глубине до 325 м отметка дна –743 м, Танганьика — при глубине 773 м отметка дна –697 м) и Ньяса — при глубине до 706 м отметка дна –235 м (Реки и озера мира, 2012).

В зависимости от рельефа местности и происхождения озерные котловины могут быть морфологически простыми и морфологически сложными. **Морфологически простая** котловина имеет округлую или вытянутую вогнутую форму с наибольшей глубиной в центральной части акватории главного (обычно — единственного) плеса, которая может быть смоделирована какой-либо простой геометрической фигурой с вертикальной осью вращения. **Морфологически сложные** котловины бывают двух типов. Одни из них состоят из нескольких замкнутых котловин, заполненных так высоко водой, что они объединяются в озерную чашу сложной формы и в плане, и в поперечном разрезе такого озера. На нем видны подводные поднятия (пороги), разделяющие отдельные части общей котловины.

Примером такого озера служит Байкал, котловина которого состоит из трех крупных блоков проседания Байкальского рифта. Северный Байкал с глубиной до 890 м отделен от Среднего подводным Академическим хребтом, находящимся между островом Ольхон у западного берега озера и полуостровом Святой Нос восточного берега. Глубина над хребтом уменьшается до 300 м, тогда как к югу от него, в Средней котловине, находится точка максимальной глубины. Средняя котловина и Южная, с глубиной до 1423 м, разделены Селенгинской перемычкой (Байкал. Атлас, 1993, 160 с.). Над ней также глубина уменьшается до сотен метров не только из-за тектоники, но и из-за отложения наносов реки Селенги — самого крупного притока Байкала.

Второй тип морфологически сложных котловин возникает в тех случаях, когда в формировании котловины принимает участие несколько различных процессов. Например, если на всхолмленной равнине развит карст, то нередко в пологой форме котловины возникают карсто-

вые воронки. Накапливающиеся в озере донные отложения кольматируют трещины в карстующихся коренных породах, уровень воды в озере повышается, и его акватория расширяется вследствие затопления рельефа местности, окружающей карстовую воронку. Поперечный профиль такого озера имеет форму, состоящую из двух фигур: одна — конусообразная — врезана в другую, относительно мелководную с пологими склонами. Подобные морфогенетические особенности озерных котловин важно учитывать при различных лимнологических расчетах.

Подавляющее большинство озер имеет свой собственный **озерный водосбор**, т. е. примыкающую к акватории озера и ограниченную водоразделом территорию, на которой формируется поверхностный речной и склоновый сток в озерную чашу. Немногие среди небольших озер, расположенных на плоских водоразделах в умеренных и полярных широтах, могут питаться только атмосферными осадками, выпадающими на их акваторию, и не иметь водосбора. Такое озеро имеет название **глухое**.

Кроме площади поверхности водосбора, для некоторых озер приходится оценивать размеры **подземного водосбора**. Так называют объем толщи почвогрунтов, в которых вследствие инфильтрации воды образуется подземный сток по водоносным горизонтам, разгружающийся в чаше озера в виде подводных ключей. В некоторых случаях такие водоносные горизонты простираются из-за пределов поверхностного водораздела, что сильно затрудняет расчеты не только притока подземных вод в такое озеро, но и формирования стока с территории соседних водосборов.

Соотношение между площадью поверхности водосбора A континентального водоема и площадью его водной поверхности F_0 называется **удельным водосбором** водоема:

$$\varphi = A / F_0. \quad (1.1)$$

Этот коэффициент показывает, во сколько раз размер водосбора превышает площадь водной поверхности водоема. Он часто используется при оценке структуры водного баланса и, соответственно, балансов других веществ, которые рассчитываются для озерной экосистемы. Для глухих озер значение $\varphi = 0$, для остальных озер диапазон значений φ исключительно широк: от 0,13 для оз. Сомтодор с $F_0 > 60 \text{ км}^2$ вблизи впадения р. Вах в Обь в Сургутском Полесье (Викулина, 1979) до 13 000 (проточное оз. Кюлянь-ярви с $F_0 = 1,6 \text{ км}^2$ на р. Кемь). Величина φ характеризует степень воздействия речного стока на озерную экосистему, размах сезонных и многолетних колебаний уровня воды в озере, его проточность, природное экологическое состояние каждого водоема суши. Этот гидрографический коэффициент природной системы «водосбор-водоем» зависит от геологического строения и происхождения рельефа озерного водосбора, дренируемого речной сетью притоков водоема.

Крупнейшие озера и озерные системы

Для возникновения и существования озера необходимо два условия:

— благоприятная форма рельефа — в пределах территории должны быть замкнутые котловины;

— благоприятный климат с избыточным или достаточным увлажнением территории, чтобы образовался сток, питающий водой эти замкнутые котловины.

Если второе условие не выполняется, в аридных зонах образуются **пересыхающие** озера. Их иногда называют «эфемерные», временно существующие озера. Вода в них накапливается в многоводные сезоны многоводных лет, в сухие периоды — испаряется. Тогда они превращаются в аридных ландшафтах в высохшую глинистую котловину с расщепленным дном — такыр, или в солончак, если в испаряющемся соленом озере образуется высыхающая корка соли, а в гумидных — в заболоченные низины.

Крупнейшие по площади эфемерные водоемы (озера-солончаки) находятся в центральных районах Австралии: Амадиес (до 8,7 тыс. км²), Торренс, Гэрднер; в восточной части Иранского нагорья — Дерьячейе-Немек (до 4 тыс. км²) на западе пустыни Деште-Кевир; на севере Намибии — Этоша — диаметром около 100 км; на юге Туниса — Джерид (Шотт-эль-Джерид), длиной 120 км, шириной 60 км, зимой — мелкое соленое озеро, летом — солончак.

На Земле — 8,5 млн озер¹ с площадью > 1 га. По данным WORLDLAKE, в 400 тыс. из них измерены глубины и только в 50 тыс. озер (< 1 % их общего числа) проводились лимнологические исследования. Суммарная площадь озер мира, по оценке С. В. Рянжина², — 2,7 млн км², а суммарный объем — 180 тыс. км³. Сведения о самых обширных озерах мира приведены в табл. 1.2.

Интегральным показателем распространенности озер на территории суши, отдельных регионов или стран служит коэффициент озерности, или просто **озерность** территории

$$K_{оз} = \sum F / A, \quad (1.2)$$

где $\sum F$ — суммарная площадь озер территории с площадью A . Площадь суши без территорий с ледниковым покровом — 133 млн км², ее «озерность» $K_{оз.} = 2,0 \%$.

Пространственное распределение значений этого показателя определяется, в первую очередь, зональным изменением структуры водного баланса суши (рис. 1.2).

Наиболее благоприятные гидроклиматические условия для существования озер характеризуют на этом графике максимумы среднего многолетнего слоя атмосферных осадков и испарения, а для увлажнен-

¹ Meybeck M. Global distribution of lakes // Physics and Chemistry of Lakes / Eds A. Lerman, D. Imboden. — Berlin : Heidelberg, 1995. — P. 1—36.

² Рянжин С. В. Много ли на Земле озер? // Природа. — 2005. — № 4. — С. 18—25.

ности водосборов — их разность — так называемый «климатический сток». Эти максимумы находятся в умеренных широтах 40—50° с. ш. и ю. ш. и в экваториальной зоне — между 10° с. ш. и 10° ю. ш. Наименее благоприятны эти условия из-за дефицита увлажненности в тропиках — 20—30° с. ш. и ю. ш. Здесь и озерность ландшафтов минимальна — 0—0,2 %. Вблизи экватора она достигает 1,5 %, а в умеренных широтах — даже 2,6—2,7 % площади территорий, рельеф которых более западинный, особенно — среди холмистой местности в поясах моренных отложений и крупнейших озер, возникших в гидроклиматическую эпоху Валдайского и Висконсинского оледенений. Озерность за счет бессточных озер больше в Северном полушарии (до 0,7 %, рис. 1.2 б) из-за обширности Каспийского и Аральского морей.

Таблица 1.2

Размеры крупнейших по площади озер мира (по: Реки и озера мира, 2012)

Часть света	Озеро	Площадь, тыс. км ²	Максимальная глубина, м	Объем, км ³
Европа	Каспий	393	1025	79 000
	Ладожское	18	230	840
	Онежское	10	127	292
Азия	Байкал	31	1640	23 000
	Аральское	18	16	75
	Балхаш	18	26	106
	Тонлесап	3—16	12	65
Африка	Виктория	69	92	2750
	Танганьика	32	1471	18 500
	Ньяса (Малави)	29	706	8400
	Чад	1—23	11	30—105
	Бангвеулу	4—15	10	5
Сев. Америка	Верхнее	82	406	12 221
	Гурон	60	228	3535
	Мичиган	58	282	4871
	Большое Медвежье	31	446 ⁵	2236 ⁵
	Большое Невольничье	27	625	2080
	Эри	26	64	487
	Виннипег	24	18	371
	Онтарио	19	224	1638
Юж. Америка	Маракайбо	13	60	279
Антарктида	Восток	16		

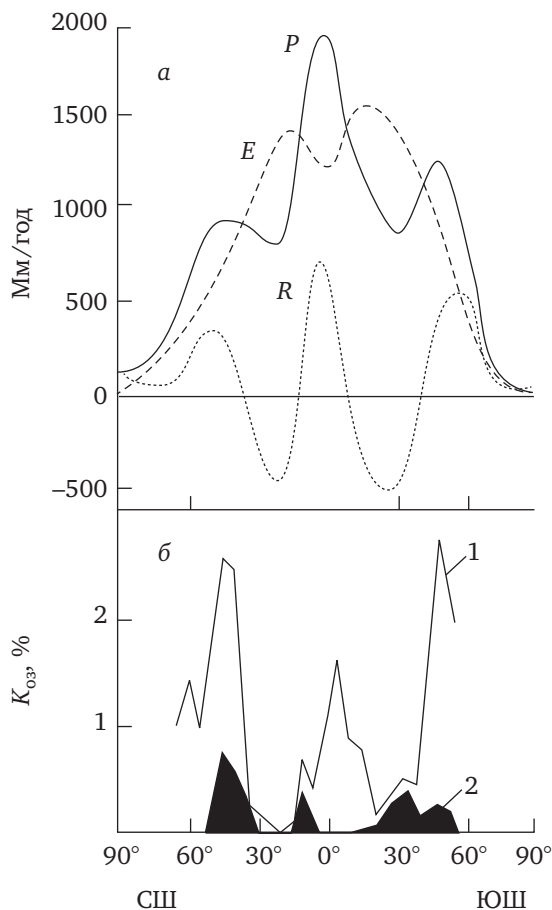


Рис. 1.2. Широтное распределение на суше среднего годового слоя (мм) атмосферных осадков P , испарения E и стока R (а), по М. И. Будыко (1977), и озерности ландшафта $K_{оз.}$, %, (б, 1 — общая и 2 — за счет соленоватых и соленых бессточных озер), по Street-Perrott and Roberts (1983)

Таким образом, озерность суши, зависящая, в основном, от климата и водного баланса природных зон, заметно увеличивается благоприятными для формирования озерных котловин геоморфологическими особенностями крупных регионов.

Средняя озерность территории России относительно велика — $K_{оз.} = 2,1\%$, практически такая же, как и всей суши. По данным гидрографической инвентаризации водных объектов с использованием крупномасштабных топографических карт¹, на ее территории находится более 2,8 млн озер с площадью свыше 1 га. Суммарная величина площади российских озер — более 360 тыс. км² (табл. 1.3).

¹ Доманицкий А. П., Дубровина Р. Г., Исаева А. И. Реки и озера Советского Союза: справочные данные. — Л. : Гидрометеиздат, 1971. — 104 с.

Показатели озерности России

Территория	Площадь A , тыс. км ²	Число озер n , тыс.	Площадь озер ΣF_o , тыс. км ²	Озерность $K_{оз.}$ %	Озерная плотность $k_{оз.п.}$ $n/1000$ км ²
Вся страна в том числе:	17 075	2752	363	2,1	161
Европейская часть	3751	507	87	2,3	135
Азиатская часть	13 324	2245	276	2,1	168

Наряду с озерностью территории все чаще в лимнологии употребляется сходный показатель $k_{оз.п.}$ — **озерная плотность**. Это — число озер в среднем на каждую тысячу квадратных километров.

Статические водные ресурсы озер России превышают 24,5 тыс. км³ (без Каспия). Среди них — глубочайшее и величайшее в мире по объему пресное озеро Байкал (23 тыс. км³) и крупнейшее в Европе Ладожское озеро (табл. 1.2). На европейской территории России находится только 18 % общего числа озер в стране, причем 15 % из них — северные озера на Кольском полуострове, в Карелии и Большеземельской тундре. Примерно также распределены озера и на Азиатской территории страны: из 82 % российского озерного фонда 36 % — в тундровой зоне Сибири и Дальнего Востока, еще 29 % — в Западной Сибири. Суммарная площадь озер на АТР в 3,5 раза больше, чем на ЕТР.

Средняя озерность тундровых районов на севере России составляет 5—10 %, но на отдельных участках она достигает значительно больших значений.

Так, в верховьях водосбора р. Уса (правый приток Печоры) на площади в 1,5 тыс. км² насчитывается более 6 тыс. тундровых озер, а ее озерность достигает 55 %¹. Велика озерность в дельте Волги — 11 % и дельтах Терека и Лены — 12 %. Столь же большая она и в Карелии — 12 % (а с учетом отнесенных к ней частей Ладожского и Онежского озер — 20 %)², хотя климат и генезис котловин этих четырех регионов совершенно различны.

Озерные системы. Большинство озер — это одиночные водоемы, вкрапленные в гидрографическую сеть, питающиеся речным стоком и питающие озерные реки. Часть озер образуют *озерные системы*, в которых несколько озер соединены озерными реками. К наиболее крупным по своим водным ресурсам относятся Великие американские озера (рис. 1.3), Великие африканские озера и Великие озера Европы:

— система Великих американских озер на границе Канады и США. Она состоит из озер Верхнее (*Superior*), Мичиган, Гурон, Эри и Онта-

¹ Голдина Л. П. География озер Большеземельской тундры. — Л. : Наука, 1972. — 102 с.

² Каталог озер и рек Карелии. — Петрозаводск : Карельской научный центр РАН, 2001. — 290 с.

рио. Они соединены короткими реками Мэри, Сент-Клер, питающей небольшое проточное оз. Сент-Клер, из которого вытекает р. Детройт — главный приток оз. Эри. Из него р. Ниагара со знаменитым Ниагарским водопадом высотой около 50 м сбрасывает воду в оз. Онтарио, а из него вытекает крупнейшая в мире озерная река Св. Лаврентия. Суммарный объем водных ресурсов этой озерной системы 22,7 тыс. км³, почти равный объему Байкала. К этой гидрографической системе относится и канадское оз. Нипигон, превращенное в водохранилище объемом в 12 км³, из которого вытекает р. Нипигон — приток оз. Верхнее, и несколько водохранилищ на притоках р. Св. Лаврентия;

— система Великих африканских озер, возникшая, по-видимому, почти одновременно в западной и восточной ветвях ВосточноАфриканской рифтовой системы. В результате самых современных геологических процессов (их свидетельством служит недавнее извержение вулкана на берегу оз. Киву) эта гидрографическая система распалась на две смежные озерные системы.

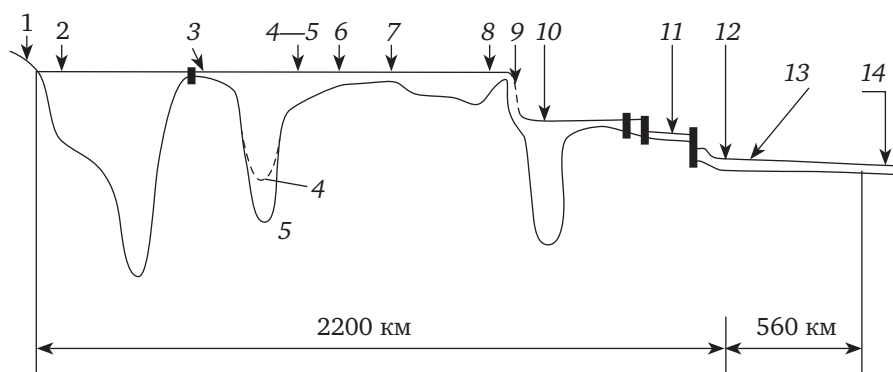


Рис. 1.3. Продольный профиль озерно-речной системы Великие озера, река Св. Лаврентия:

- 1 — г. Дулут; 2 — оз. Верхнее; 3 — р. Сент-Мэри; 4 — оз. Мичиган
и 5 — оз. Гурон, соединенные проливом Макино; 6 — река и оз. Сент-Клер;
7 — р. Детройт; 8 — оз. Эри; 9 — р. Ниагара; 10 — оз. Онтарио; 11 —
водохранилище Сент-Френсис на р. Св. Лаврентия; 12 — г. Монреаль;
13 — эстуарий и 14 — залив Св. Лаврентия в Атлантическом океане

Одна из них относится к бассейну р. Конго и состоит из оз. Киву, вытекающей из него р. Рузизи и впадающей в оз. Танганьика. До 1887 г. это озеро, второе в мире по глубине (1470 м), считалось бессточным, но в результате пятящейся эрозии один из притоков р. Конго — р. Лукуга — прорезала внешний край озерной котловины. И уже более столетия Танганьика при высоком уровне воды стала в многоводные фазы своего гидрологического режима периодически сточным озером. Водные ресурсы этой озерной системы составляют более 20 тыс. км³.

Вторая африканская система состоит ныне из шести озер, объединенных р. Виктория. Она считается верхним течением р. Нил. Выте-

кает из оз. Виктория, вдвое большего по площади, чем оз. Танганьика, протекает через западный плес оз. Кьёга. Ниже по течению принимает сток из оз. Квантия, а после водопада Мерчисон (высота 40 м) протекает через северную оконечность оз. Альберт. Вытекающий из него Нил именуется Альберт-Нилом, затем — Бахр-эль-Джебел, далее — Белым Нилом и, наконец, после слияния с Голубым Нилом — рекой Нил. Пятым озером в этой озерной системе служит небольшое оз. Джордж, находящееся к северозападу от оз. Виктория и соединяющееся каналом Казинга с шестым — более крупным оз. Эдуард (на некоторых картах называемое Амин-Дада). Оно расположено, как и оз. Альберт (Мобуту-Сесе-Секо), в северном конце западной ветви африканского рифта. Они соединяются порожистой р. Семлики. Суммарные водные ресурсы второй, разветвленной системы африканских озер, не превышают 3 тыс. км³.

И, наконец, занимающее южный конец африканского рифта оз. Ньяса (Малави). Оно, почти столь же большое по площади, как Танганьика, но вдвое менее глубокое, стало истоком р. Шари, впадающей в нижнее течение р. Замбези;

— система Великих озер Европы расположена в основном вдоль границы между Балтийским кристаллическим щитом и Русской платформой. Она состоит из Онежского озера, р. Свирь, Ладожского озера. К этой системе относится Сайма, самое крупное финское озеро и р. Вуокса, соединяющая его с Ладожским озером. С юга в него впадает р. Волхов, вытекающая из мелководного оз. Ильмень. Исходя из истории возникновения этой озерной системы, ее пятым озером С. В. Калесник¹ назвал Чудско-Псковское озеро (Пейпси по-эстонски). Оно имеет сток через р. Нарва в Финский залив. Водные ресурсы этой озерной системы более 1,2 тыс. км³.

Озерные районы. Для всей непокрытой льдом суши значение коэффициента озерной плотности $k_{\text{оз.п}} = 64$, для России его значение в 2,5 раза больше — 161 (табл. 1.3), а для ее океанических островов $k_{\text{оз.п}} = 3200$ (более трех озер на квадратный километр). В отличие от значений $K_{\text{оз.}}$, показывающих, что озерность ЕТР несколько больше, чем азиатской территории РФ, встречаемость озер в АТР в среднем на 25 % чаще, чем в европейской. Из 20 гидрографических районов России к озерным со средним значением $k_{\text{оз.п}} > 200$ озер на 1000 км² можно отнести Кольский полуостров, на Баренцевоморском побережье которого, как и в Ненецком автономном округе, $k_{\text{оз.п}} > 1000$; Карелию и Северо-запад ЕТР; Западную Сибирь к северу от 56-ой параллели; Центральнаякутскую равнину; Северо-Сибирскую, Яно-Индибирскую и Колымскую низменности.

Наиболее крупные озерные районы в зарубежной Европе — Балтийское поозерье, включающее Северную Германию, Мазурские озера в Польше, озера Беларуси и Прибалтики, озерные районы Южной Швеции и Финляндии, которую называют «страна тысячи озер».

Крупнейший озерный регион в Северной Америке расположен широкой дугой вокруг Гудзонова залива в Канаде и в штатах Миннесота и Висконсин США.

¹ Калесник С. В. Ладожское озеро. — Л. : Гидрометеиздат, 1968. — 159 с.

Во второй половине XX века в Средней Азии образовалось несколько больших **антропогенных озер**, не водохранилища, а озера: Айдаркуль — на южной окраине Голодной степи в Узбекистане, и оз. Сарыкамышское — на севере Туркмении¹.

В очень многоводный 1969 г. в бассейне р. Сырдарья гидроузел Чардаринского водохранилища не мог пропустить волну половодья, и часть стока этой реки была сброшена по оросительным каналам хлопковых плантаций в Арнасайскую бессточную котловину с солончаковыми болотами на дне. В ней образовалась система из трех озер (на картах оз. Айдаркуль), по размерам (2,3 тыс. км² и 14 км³) вдвое больше Чардаринского водохранилища. Вследствие деструкции большой массы затопленных растительных остатков на дне и насыщения воды биогенными веществами в условиях интенсивной почти круглогодичной солнечной радиации озера сразу превратились в высокопродуктивные эвтрофные водоемы. В них необычайно быстро наступила сильнейшая вспышка развития ихтиофауны. Рыбы стало так много, что несколько поселений перекочевало на берега Айдаркуля, возник рыбный промысел. Но, по мере усыхания водоема (до 1,7 тыс. км²) и его заполнения дренажно-сбросными водами с большим количеством пестицидов и других ядохимикатов, качество рыбопродукции снизилось настолько, что она стала непригодной для пищи. Возникла крупная социальная проблема не только из-за отравлений населения, но и безработицы.

Подобна ситуация и с ирригационно-сбросовым озером, образовавшимся в Саракамышской впадине. В нее также сбрасываются дренажные воды с орошаемых массивов, расположенных вдоль долины нижнего течения Амударьи, и к 1980-м годам этот водоем достиг такого же размера (2,85 тыс. км² и 27 км³) как Малое море в чаше разделившегося на два водоема Аральского моря (см. Михайлов и др., 2005, табл. 7.5). Саракамышское озеро тоже очень рыбопродуктивно. И туда из обсыхающей дельты Амударьи стали постепенно по пескам тракторами перетаскивать аральский рыбопромысловый флот. И здесь сначала добывали много рыбы. Но, вследствие испарения воды из образовавшегося в пустыне нового озера и повышения в его водной массе концентрации минеральных веществ и ядохимикатов, также наступил запрет на лов рыбы.

1.3. Водохранилища и пруды, их водохозяйственное назначение

Водохранилище — *природно-техногенный* водоем, созданный для накопления воды и регулирования стока. В этом — его главное гидрологическое и водохозяйственное отличие от озер. Для его сооружения в *природном* понижении рельефа местности разрабатывается *технический* проект водоподпорной плотины.

Пруд — тоже созданный населением водоем для накопления воды, но не для активного регулирования стока. Пруды, как и озера, осуществляют пассивное его регулирование, поскольку расход воды, стекающей из них, определяется высотой уровня над порогом водослива, а также площадью и формой его поперечного сечения. Практикуемое эпизодическое частичное или полное опорожнение прудов для чистки ложа или других целей следует рассматривать как антропогенный паводок.

¹ Никитин А. М. Озера Средней Азии : Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. — Л. : Гидрометеиздат, 1987. — 106 с.

По размерам водохранилища, как правило, существенно больше прудов, так как площадь водной поверхности пруда обычно не превышает 1 км², а емкость ложа составляет менее 1 млн м³.

Создание техногенных водоемов

Остатки египетских плотин в районе Каира, обнаруженные археологами, имеют возраст 5—5,5 тыс. лет. Из действующих по сей день водохранилищ самое древнее — Хоме на р. Эль-Аси в Сирии¹ у г. Хоме к северу от ее столицы Дамаска. Древнегреческий историк Страбон, живший в I веке до нашей эры, строителями плотины этого водохранилища объемом порядка 200 млн м³ называет египтян, а время строительства относит к третьему тысячелетию. Значит, возраст водохранилища Хоме — около 5 тысяч лет, а его плотина неоднократно реконструировалась.

Самое старое водохранилище в России — Алапаевское. Оно расположено на р. Нейве в г. Алапаевске на восточном склоне Среднего Урала (Вода России, 2001). Это малое водохранилище площадью 2 км² и объемом 5 млн м³ сооружено в 1704 г. для обеспечения механической энергией и водой одного из первых металлургических заводов.

В 15 раз большее Вышневолоцкое водохранилище создано в 1719 г. в долинах р. Шлины и ее притока Цны у г. Вышний Волочек для обводнения верховьев рек Меты и Тверды на сооруженном в царствование Петра I водном пути, соединяющем Волгу с Санкт-Петербургом. С 1951 г. на этом водохранилище сезонного регулирования стока работают две ГЭС: деривационная Ново-Тверецкая и приплотинная Ново-Цнинская с суммарной мощностью 2,7 МВт. В маловодные периоды это водохранилище служит одним из источников водоснабжения г. Москвы.

Старейшее водохранилище в США — Massabesik Lake площадью ~10 км² на р. Cohas Brook построено в 1738 г. вблизи г. Манчестер (штат Нью-Гемпшир)² для городского и промышленного водоснабжения. В начале XX века в мире существовало³ уже 40 больших водохранилищ, объемом каждое >0,1 км³. К 1950 г. их число увеличилось до 540, затем темп сооружения водоемов многократно возрос: за 1961—1970 гг. построили 700 таких водоемов. В последующие десятилетия число вводимых в эксплуатацию водохранилищ стало снижаться, и за 1990—2000 гг. не превысило 70. В настоящее время в мире насчитывается более 60 тыс. больших и малых водохранилищ с общим объемом воды в них свыше 6 тыс. км³ и общей площадью порядка 400 тыс. км². Отдельные водохранилища имеют длину до 500 км, ширину — 60—70 км и глубину — до 300 м. Основные водные ресурсы водохранилищ мира (почти 99 %) сосредоточены в больших водохранилищах емкостью свыше 0,1 км³, число которых к концу XX века составило 2836. Сведения о крупнейших водохранилищах мира приведены в табл. 1.4.

¹ Бобров В. А. На перекрестке цивилизаций. — М. : Мысль, 1975. — 175 с.

² Martin R. O. R., Hanson R. L. Reservoirs in the United States. US Government Printing Office. — Washington, 1966. — 120 p.

³ Авакян А. Б., Яковлева В. Б. Новые данные о водохранилищах мира // Гидротехническое строительство. — 1999. — № 3. — С. 8—12.

Водохозяйственные параметры крупнейших водохранилищ мира (Авакян и др., 1987; Реки и озера мира, 2012)

Водохранилище (гидроузел)	Страна	Река, озеро	Год заполнения	Объем, км ³		Площадь, км ²		Напор, м
				полный	полезный	акватории	чаши озера	
Виктория (Оуэн-Фолс)	Уганда, Танзания, Кения	Виктория-Нил, оз. Виктория	1954	2905	205	76 000	68 000	31
Онтарио (Ирокуэй)	Канада, США	Св. Лаврентия, оз. Онтарио	1958	1740	30	19 560	19 000	23
Братское	Россия	Ангара	1967	169	48	5470	—	106
Насер (Саад-эль-Али)	Египет, Судан	Нил	1977	162	90	5120	—	95
Кариба	Замбия, Зимбабве	Замбези	1963	160	46	5580	—	100
Вольга	Гана	Вольга	1967	148	90	8480	—	148
Гури	Венесуэла	Карони	1986	135	55	4250	—	150
Красноярское	Россия	Енисей	1970	73	30	2100	—	100
Виллистон	Канада	Пис-Ривер	1968	70	37	1680	—	165
Зейское	Россия	Зeya	1975	68	38	2420	—	98
Каборра-Басса	Мозамбик	Замбези	1977	63	52	2740	—	127
Ла-Гранд-2	Канада	Ла-Гранд	1990	61	29	4080	—	150
Усть-Илимское	Россия	Ангара	1977	59	3	1930	—	88

Водохранилище (гидроузел)	Страна	Река, озеро	Год заполнения	Объем, км ³		Площадь, км ²		Напор, м
				полный	полезный	акватории	чаши озера	
Куйбышевское	Россия	Волга	1957	58	35	6450	—	29
Ла-Гранд-3	Канада	Ла-Гранд	1991	56	16	2460		75
Бухтарминское	Казахстан	Иртыш, оз. Зайсан	1967	50	31	5490	1780	67
Ататюрк	Турция	Ефрат	1992	49	39	820		175
Иркутское	Россия	Ангара, оз. Байкал	1959	48	47	3300	31 500	30
Тукуруи	Бразилия	Токантинс	1983	46	25	2430	—	45
Серрос-Колорадос	Аргентина	Неукен	1971	43	6	610		75
Санья	Китай	Янцзы	2010	39	22	1080	—	175
Вилуйское	Россия	Вилуй	1972	36	18	2180	—	68
Смолвуд	Канада	Черчилл	1971	32	28	5710	2850	14
Волгоградское	Россия	Волга	1960	31	8	3120	—	27

В водохранилищах России суммарный объем воды, который может быть накоплен, составляет 860 км³. Суммарная площадь водохранилищ России — 67 тыс. км², вдвое больше, чем акватория Байкала. Общее число водохранилищ — 2650 (Вода России, 2001).

Почти все гидроузлы крупных водохранилищ России оборудованы ГЭС. На рубеже XX-XXI веков число российских водохранилищ (емкостью $W > 0,1$ км³) и их суммарный объем сопоставимы с техногенными водными ресурсами лишь пяти стран (Авакян, Яковлева, 1999):

	США	Канада	Россия	Бразилия	Китай	Индия
Число водоемов	702	1 54	104	109	265	212
ΣW км ³	700	876	839	441	345	248

В России наибольшими техногенными водными ресурсами обладает Восточно-Сибирский регион. Суммарная емкость созданных там водоемов составляет почти 370 км³ (44 % общего объема водохранилищ и прудов в стране). Наибольшее число крупных прудов и водохранилищ — более 600 — в Поволжском регионе. Наиболее плотная сеть техногенных водоемов — в Центрально-Черноземном районе — почти 3 водоема на 1000 км² из-за множества прудов.

В 1920—1940 гг. одновременно с резким сокращением количества мельничных прудов на малых реках в России начала расширяться зародившаяся в XIX веке сеть сельских прудов. Они строились преимущественно стихийно для орошения и водопоя скота в Рязанской, Саратовской, Ростовской областях и Краснодарском крае, началось их сооружение и в Челябинской области. В следующем двадцатилетии число сельских прудов удвоилось. Особенно много их стало в Саратовской области и Краснодарском крае, началось их строительство в дельте Волги, в Ставропольском крае, в Оренбургской, Волгоградской, Куйбышевской и Курской областях. Но наибольший рост числа малых водоемов рыболовного и сельскохозяйственного назначения произошло в 1960—1979 гг., когда их число в стране возросло в 4 раза. Кроме учтенных крупных прудов, масса маленьких водоемов находится в городах, селах и поселках: запруды на ручьях, **копани** (выкопанные пруды), затопленные водой выработанные карьеры (Румянцев, Кромер Р., 2008).

Принцип регулирования стока и основные компоненты гидроузла

Регулирование стока водохранилищем состоит в управлении русловым стоком с целью изменить режим колебания расхода воды и колебаний ее уровня в речной системе или на ее отдельном участке. Это требуется для того, чтобы обеспечить водными ресурсами гидроэнергетику, муниципальное и промышленное водоснабжение, судоходство, орошение и другие отрасли водного хозяйства, для предотвращения наводнений в речных долинах. Принцип такого регулирования состоит в накоплении воды в созданном водохранилище в многоводный период и ее планомерном расходовании в маловодье (рис. 1.4).

Чтобы создать водохранилище, сооружается **гидроузел** — совокупность нескольких гидротехнических сооружений. Их состав в каждом