

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ

Ярославль
2024

УДК 574.58:91
ББК 28.082.1в7
Г35

Авторский коллектив:

С.А. Поддубный, В.В. Законнов, А.В. Кутузов, А.В. Законнова,
О.Л. Цельмович, Н.Г. Отюкова, И.Э. Степанова, А.И. Цветков, Л.А. Кучай

Рецензенты:

А.В. Крылов, доктор биологических наук, профессор,
ИБВВ РАН, Борок, Россия
Ю.С. Даценко, доктор географических наук,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Издание подготовлено к публикации по решению Ученого совета ИБВВ РАН

Г35 **Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов /**
С. А. Поддубный, В. В. Законнов, А. В. Кутузов [и др.] ; отв. ред. С. А. Поддубный. – Ярославль : Филигрань, 2024. – 206 с.
ISBN 978-5-6050550-9-9

В книге рассмотрены методики изучения гидрологических и гидрохимических процессов в разнотипных внутренних водоемах. Охарактеризована приборная база в историческом и современном аспектах. Приведены кратко основные результаты гидролого-гидрохимических исследований, полученные лабораторией гидрологии и гидрохимии с момента ее существования до настоящего времени. В отдельную главу помещена биографическая информация о сотрудниках лаборатории, заложивших основу гидролого-гидрохимических исследований в ИБВВ РАН.

Книга рассчитана на географов, гидробиологов, экологов широкого профиля, студентов географических и биологических специальностей.

DOI: 10.47021/monography_653faaf94c6bc8.69020116

УДК 574.58:91
ББК 28.082.1в7

ISBN 978-5-6050550-9-9

© Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, 2024
© А.С. Сажнев, фото на обложке

*Посвящается ученым гидрологам и гидрохимикам,
заложившим основы изучения
гидрологии и гидрохимии рек, озер и водохранилищ
в Институте биологии внутренних вод
им. И.Д. Папанина Российской академии наук*

Предисловие

Настоящая книга представляет собой существенно переработанную и дополненную современными материалами главу «Физические факторы водной среды» и «Химические факторы водной среды» книги «Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов», изданной под редакцией Ф.Д. Мордухай-Болтовского в 1975 г. К настоящему времени, спустя почти 50 лет с момента выхода в свет указанного методического пособия, произошли существенные, а порой и глобальные изменения в методике изучения абиотического звена водных экосистем. За это время изменился парк гидрологических приборов, основанных на все большем применении цифровых технологий по сравнению с аналоговыми. Кроме того, существенную нишу в изучении водных экосистем стали занимать многоцелевые дистанционные методы, основанные в том числе и на анализе космических снимков водной поверхности.

Монография не ставит своей целью заменить методические учебные пособия по изучению гидрологического и гидрохимического режимов внутренних водоемов, а также многочисленные наставления, руководства, СНИПы и т.д. Основная задача книги заключается в обобщении методических подходов с использованием разнообразного оборудования, которые легли в основу многолетних исследований озер, рек и водохранилищ, выполненных ранее и осуществляемых в настоящее время лабораторией гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (в прошлом АН СССР). Существенной частью монографии, на наш взгляд, является представление основных результатов многолетних наблюдений за гидрологическим и гидрохимическим режимом разнотипных водных объектов Европейской части России (СССР) и Кавказа. В процессе написания книги нами были использованы в оригинале отдельные части названных выше глав «Методики изучения биогеоценозов внутренних водоемов».

В определенной степени монография отражает экспедиционную и научную деятельность лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН за весь период ее существования.

С.А. Поддубный

Введение

Каждый водный объект – река, озеро, водохранилище или пруд – представляет собой экологическую систему, развитие которой определяется взаимодействием термических, динамических, химических и биологических процессов. При этом внутренние процессы функционирования абиотической части водной экосистемы, такие как физические, физико-химические и химические (без учета организмов), биохимические и биологические (с учетом организмов), управляют пространственно-временной изменчивостью экосистемы. Следует отметить, что последние две группы процессов связаны с взаимодействием абиотической и биотической частей водной экосистемы и, по мнению В.Н. Михайлова и К.К. Эдельштейна (1996, с. 31), являются составной частью «гидроэкологии, изучающей водные (аквальные) экосистемы, их структуру и закономерности функционирования, включая взаимодействие абиотических и биотических компонентов». Актуальность изучения взаимодействия между абиотической и биотической частями экосистемы подчеркивал и Г.Г. Винберг (1978, с. 128): «... на современном этапе развития наших знаний внимание концентрируется на анализе разных проявлений взаимосвязанности биологических явлений и их закономерной связи с абиотическими факторами».

Интенсивность физико-химических и биологических процессов и особенности их взаимодействия зависят от географического положения водоемов, масштабов массо- и энергообмена с окружающей средой, строения и морфометрических параметров ложа и от хозяйственного использования. Внешним проявлением названных процессов служат водный и ледово-термический режим водоема, временная изменчивость и пространственная неоднородность химического состава воды, видового состава и численности водных растений и животных.

Характерной особенностью озеровидных водоемов является замедленный водообмен, обуславливающий накопление в них поступающих взвешенных, влекомых наносов, растворенных веществ. Процесс накопления наиболее четко проявляется в формировании донных отложений. Состав, строение озерных отложений, интенсивность их накопления, видоизменение отложившегося материала во времени зависят от географических особенностей бассейнов и режима каждого водоема. В отличие от рек, где поступление, распределение и переработка наносов связаны, в первую очередь, со скоростью течения и механическими воздействиями потока на русло (воздействие других факторов имеет второстепенное значение), частицы, попавшие в воду озера извне или возникшие в самом водоеме,

подвергаются сложному совокупному воздействию динамических, термических, химических и биологических процессов. Эти процессы приводят к изменениям состава воды, ее оптических свойств, газового режима (Богословский, 1960; Богословский и др., 1984; Эдельштейн, 2014).

Исследования донных отложений в водохранилищах имеют общелимнологическое значение. В искусственно созданных водоемах характер накопления и распределения, механический и химический состав донных отложений отражают весь комплекс процессов, протекающих в водоеме. Всестороннее изучение донных отложений водохранилищ представляет значительный интерес, прежде всего, при выяснении их роли в круговороте органического вещества, для суждения об условиях жизни донной фауны водохранилищ, особенностях ее распределения и продуктивности. Количественная оценка источников грунтообразующего материала и интенсивности заполнения чаши водохранилищ отложениями совершенно необходима для правильной оценки сроков заиления водоемов и их эффективной эксплуатации (Буторин и др., 1975).

Следует отметить, что для рационального и эффективного использования водоемов необходимо познание всех особенностей его режима и протекающих в нем процессов, а также умение предвидеть и предвычислить воздействие хозяйственной деятельности человека. Антропогенный фактор может привести к значительному изменению установившихся физических свойств воды и ее химического состава. Природные воды, используемые человеком для бытовых нужд и для всесторонней производственной деятельности, возвращаются в водоемы (водотоки) с иными характеристиками, определяющимися теми примесями, которые в них поступили, и степенью очистки сточных вод от них. Изменение природных характеристик воды может происходить и при использовании водоемов транспортными средствами, для рекреационных целей, при разработке на берегу и в прибрежной зоне природных ископаемых и т.д. В результате исходные воды могут обогащаться некоторыми из тех химических соединений, которые уже в них имелись; однако чаще в водоемы в этих случаях поступают новые для них химические соединения или вещества в растворенном или взвешенном состоянии (Методика изучения..., 1975).

Решение такой сложной задачи, как рациональное природопользование, возможно путем проведения комплексных исследований водоема и его водосбора специалистами различных отраслей. Формы комплексных лимнологических исследований разнообразны: регулярные (режимные) стационарные наблюдения у берега и в открытых районах акватории, экспедиционные наблюдения (разнообразные съемки водоема) и изучение

отдельных процессов путем постановки экспериментов в природных условиях (Эдельштейн, 1989).

Предлагаемая книга состоит из шести глав. В первой главе охарактеризованы методы гидрологических наблюдений, исследуемые параметры водной среды и приборная база в историческом и современном аспекте. Во второй главе приводятся основные подходы к анализу гидрологической информации. В третьей главе показаны возможности использования дистанционных методов для изучения функционирования отдельных звеньев водных экосистем. В четвертой главе кратко рассмотрены возможности применения методов математического моделирования при изучении гидрофизических процессов в озерах и водохранилищах. В пятой главе охарактеризованы подходы, методы и оборудование при изучении химического состава воды. Шестая глава посвящена сотрудникам лаборатории, внесшим свой вклад в изучение гидрологических и гидрохимических процессов во внутренних водоемах России и ряде республик СНГ.

Книга подготовлена коллективом лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН. Авторский коллектив монографии: зав. лабораторией, д.г.н. С.А. Поддубный, ведущий научный сотрудник, д.г.н. В.В. Законнов, младший научный сотрудник, к.г.н. А.В. Кутузов, научные сотрудники – А.В. Законнова, О.Л. Цельмович, Н.Г. Отюкова, И.Э. Степанова, А.И. Цветков, ведущий инженер Л.А. Кучай. В подготовке работы непосредственное участие принимали: инженер-программист Е.В. Чаморовская, ведущие инженеры – Т.Л. Сметанина, Н.В. Васильева, старшие инженеры – А.В. Буйневич, М.В. Цветкова, лаборанты О.А. Лебедева, А.П. Куликова, Е.П. Масленникова.

Авторы выражают благодарность заведующей архивом Института Л.П. Дзюбан за помощь в поиске и предоставлении материалов о сотрудниках лаборатории.

Глава 1. Гидрофизические исследования водной среды

Основная цель гидрологических работ при биоценологических исследованиях – получение данных для всесторонней физико-географической характеристики водоема. Знание гидрологического режима водоемов и состава их вод необходимо прежде всего для характеристики среды обитания организмов и биоценозов. Изучение динамики водных масс и изменчивости гидрологических характеристик позволяет оценить масштабы физических процессов, происходящих в водоеме, и показать их влияние на экосистему водоема.

К основным видам комплексных гидрологических исследований могут быть отнесены регулярные стационарные наблюдения у берега и в открытых районах акватории, а также экспедиционные наблюдения (разнообразные съемки водоема). В первом случае гидрологические характеристики измеряются на постоянно закрепленных (стандартных) станциях в пределах акватории водоемов с дискретностью, захватывающей характерные сезонные изменения его гидрометеорологического режима (например, для Рыбинского водохранилища установлена периодичность таких съемок два раза в месяц в течение вегетационного периода). Во втором случае скоростные съемки или съемки по учащенной сетке станций проводятся для выявления закономерностей распределения полей гидрологических и гидробиологических характеристик в определенные моменты сезона.

1.1. Выбор сетки гидрологических станций

Одним из важных этапов при гидрологических исследованиях является выбор оптимальной сетки станций (пунктов наблюдений). С одной стороны, она должна быть достаточной для того, чтобы выявить особенности пространственной неоднородности в полях гидрологических характеристик. С другой стороны, чрезмерно густая сеть станций удлиняет общую продолжительность наблюдений, что при большой гидродинамической активности водных масс затрудняет интерпретацию собранных материалов.

При разработке схемы станций не следует забывать о целесообразности относительно равномерного распределения вертикалей по площади водоема для составления общего представления о нем. В то же время пункты наблюдений желательно располагать в определенном порядке, чтобы получились продольные и поперечные разрезы водоема. Число раз-

резов и вертикалей на них определяется задачами исследования и морфометрическими особенностями водоема. Желательно определять гидрологические вертикали на наиболее характерных морфологических участках. Так, для водохранилищ долинного типа могут быть рекомендованы гидрологические разрезы с тремя либо пятью станциями. Расположение станций при этом следующее: русло, правая и левая затопленные поймы либо русло, правый и левый склон русла (либо бровки русла) и правая и левая поймы. В зонах выклинивания подпора водохранилищ, где режим приближается к речному, достаточно бывает одной русловой вертикали. Дополнительные станции наблюдений либо дополнительные разрезы следует определять в местах сброса бытовых и промышленных стоков либо подогретых вод теплоэлектростанций.

Основой планирования сети станций для длительных стандартных наблюдений может служить выделение районов, относительно однородных по комплексу параметров среды. Выделение таких районов может быть выполнено методом объективной классификации (см. раздел «Выделение водных масс»). Для каждого такого района достаточно одной станции, которая будет характеризовать весь район по заданному комплексу показателей (Методика изучения..., 1975).

1.2. Определение местоположения станций наблюдений

В настоящее время определение местоположения гидрологических станций на акватории водоемов осуществляется с помощью навигационных приборов – навигаторов. Общедоступность систем позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) привела к массовому выпуску навигаторов, основным назначением которых является вычисление текущего местонахождения и определение скорости движения объекта. Наиболее удобны при проведении гидрологических работ переносные GPS навигаторы серии Garmin (рис. 1.1а).

В недалеком прошлом (вторая половина XX века) закрепление пунктов гидрологических наблюдений (станций) проводилось следующим образом. На начальном этапе положение станций наносили на карту. В зимний период станции обозначали вехами или фанерными плакатами, замороженными в лед. От места выезда на лед до каждой станции вычисляли азимут и расстояние движения на машине или вездеходе. В безледный период на обширных водных пространствах нахождение станций осуществлялось по судовому компасу и расстоянию от закрепленного ориентира, например, навигационного буйа. Расстояние определяли, зная скорость судна, которую, в свою очередь, определяли или корректировали на мерной миле.

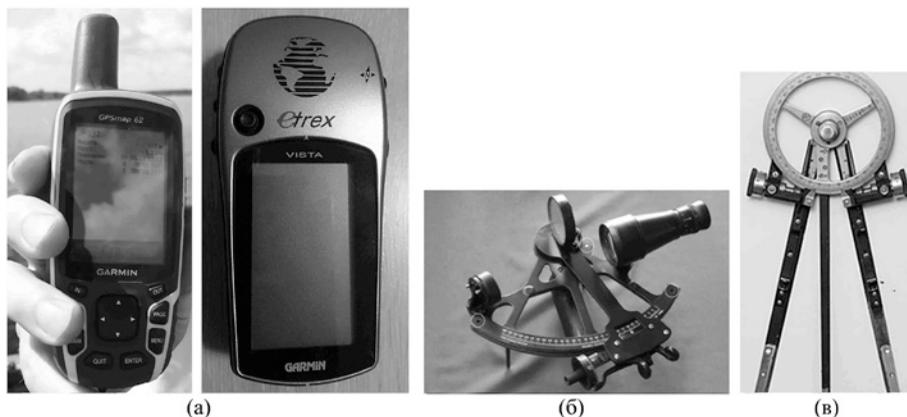


Рис. 1.1. Приборы для определения местоположения станций: а – GPS навигаторы, б – секстан, в – протрактор.

На небольших участках речных плесов водохранилищ и малых озерах, на берегах которых имелось достаточное количество закрепленных на местности ориентиров (церкви, водонапорные башни, отдельно стоящие здания и т.д.), положение станций фиксировали с помощью секстана по двум смежным углам и закрепляли буйками, соединенными тросами с якорем (Исследование течений..., 1972; Эдельштейн, 1972). По измеренным углам на карту наносили точки станций с помощью протрактора (рис. 1.1б, в). В частности такое жесткое закрепление станций на оз. Плещеево позволило провести ряд последовательных съемок температурного поля озера и выявить особенности перемещения во времени локальных температурных аномалий и динамики термоклина (Поддубный, 1986; Поддубный, 1992).

В настоящее время указанный выше метод закрепления станций наблюдений на ограниченных акваториях может быть использован с применением GPS навигаторов.

1.3. Измерение глубины на станции

Измерение глубины проводится обязательно перед началом работ на каждой гидрологической станции. В качестве приборов могут быть использованы ручной лот, лебедки с автоматическим счетчиком вытравленной длины троса и эхолоты различных марок. На сегодняшний день ручные методы измерения глубины в большей степени заменяются акустическими. Тем не менее на акваториях с небольшими глубинами может быть использован ручной лот. При работе ручным лотом лотлинь (пеньковый

либо капроновый трос) должен быть предварительно вымочен и растянут, а затем размечен марками через 1 м.

На экспедиционных судах в прошлом веке измерения глубины вертикалей проводили с помощью лебедок. При этом к тросу карабином крепили гидрометрический груз весом не менее 5 кг, затем груз опускали до поверхности воды, показания счетчика лебедки устанавливали на ноль и опускали груз до дна. В момент касания грузом дна (момент появления слабину троса) по показанию счетчика лебедки определяли глубину вертикали. Точность определения глубины при помощи ручного лота или по счетчику лебедки должна быть не более 0.1 м.

Наиболее сложными и совершенными приборами для измерения глубины являются эхолоты, которые позволяют получить непрерывную запись профиля дна. Разнообразие эхолотов велико: с монохромным и цветным дисплеем, любительские и профессиональные с разнообразным диапазоном глубин. В частности, на экспедиционном судне ИБВВ РАН «Академик Топчиев» используется приемопередатчик АИС Транзас T105B с антенной GPS / Glonass и эхолот MTDS 2008 с возможностью подключения к периферийным устройствам.

1.4. Измерения температуры и электропроводности воды

В процессе многолетних наблюдений за абиотической средой водоемов гидрологическая приборная база постоянно модифицировалась как в глобальном промышленном, так и в локальном местном масштабе. Ряд научно-исследовательских институтов имел свои производственные базы, где проводились разработки оригинальных приборов, позволяющих надежно и быстро измерять основные гидрологические характеристики в любые сезоны года.

1.4.1. Регулярные стационарные наблюдения

Температуру воды у поверхности измеряли водным термометром в оправе в штилевую погоду на горизонте 0.1 м, а при волнении более одного балла – на глубине 0.5 м. Для устранения теплового влияния оправы ее резервуар дважды ополаскивали в воде, после чего термометр опускали в воду и выдерживали в течение 3 мин. Подняв термометр и не выливая воду из стаканчика оправы, температуру отсчитывали с точностью до 0.1°C. В современных условиях показания водного термометра могут быть полезны для уточнения и корректировки температуры воды, измеренной зондирующей и дистанционной аппаратурой.

Измерение температуры воды по вертикали проводится, как правило, на горизонтах через метр глубины, за исключением придонного. Горизонты

отсчитывают от поверхности воды, а зимой от нижней поверхности льда. Особое внимание следует обращать на измерение температуры в слое скачка (область с наибольшими градиентами температуры). Если основных горизонтов измерения для этой цели недостаточно, то следует проводить дополнительные измерения с большей дискретностью по глубине.

На начальном этапе исследования водохранилищ (1950-е и начало 1960-х гг.) для измерения температуры воды по вертикали использовали глубоководные опрокидывающиеся термометры (рис. 1.2). Для погружения глубоководных термометров применяли специальные рамы, в которые вставляли по два термометра. Измерения на вертикали, как правило, выполняли серией приборов с выдержкой термометров на заданном горизонте 5–7 мин. Отсчеты по основному термометру записывали с точностью до 0.01°C , а по вспомогательному – до 0.1°C . Для получения истинного значения температуры на данной глубине показания основного термометра исправляли двумя поправками: инструментальной и редуциционной (Методика изучения..., 1975).

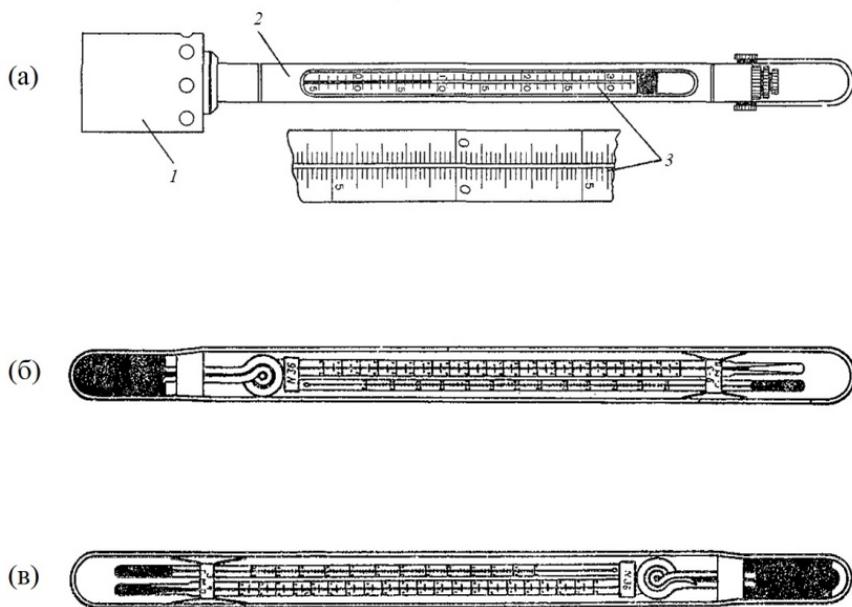


Рис. 1.2. Термометры для измерения температуры воды: а – водный с ценой деления 0.2°C (1 – стакан с отверстиями, 2 – металлическая оправа, 3 – шкала), б – глубоководный опрокидывающийся положение при измерении температуры, в – то же положение при отсчете температуры.

В начале 1960-х гг. глубоководные термометры постепенно заменили на электротермометры (представляли собой мост сопротивлений с полупроводниковым термосопротивлением, амперметром и блоком питания), а в последствии на термокаппметры, изготовленные в экспериментальной мастерской Института на основе реохордного моста Р-38 в комплекте с кондуктометрической ячейкой Х-38.

Прибор позволял измерять температуру и электропроводность воды непосредственно в водоеме. Точность измерения температуры составляла 0.1°C , а электропроводности с фактической ошибкой метода – 2% (рис. 1.3). Для исключения температурного фактора все измерения электропроводности приводили к температуре 18°C умножением результатов измерения на температурный коэффициент (Ершова, Эдельштейн, 1966).

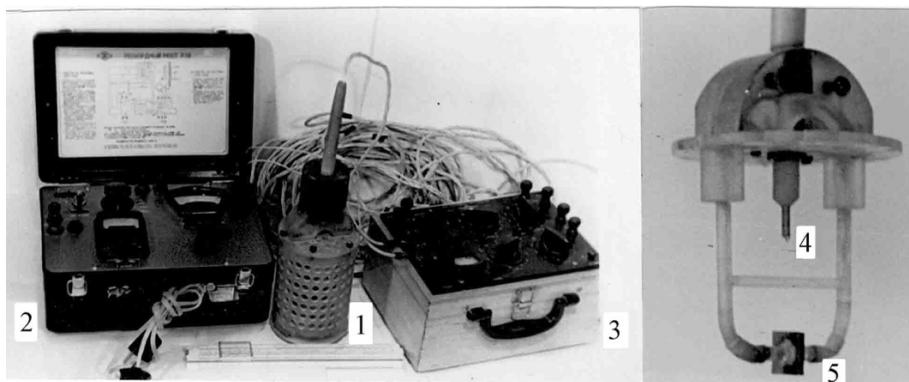


Рис. 1.3. Термокаппметр. 1 – общий вид прибора, 2 – мост Р-38, 3 – мост измерения температуры МВУ-49, 4 – датчик температуры – полупроводниковое сопротивление ММТ-4, 5 – датчик электропроводности – платиновые электроды.

В целях автоматизации процесса измерения гидрологических параметров в судовых условиях в ИБВВ АН СССР в начале 1970-х гг. внедряли в практику научных исследований измерительную аппаратуру на базе светолучевых осциллографов.

Аппаратура включала блок автоматики, светолучевой осциллограф, измерительные схемы, измерительные датчики и автономные источники питания. Измеряемые параметры регистрировали на фотоленту осциллографа К12-21 (рис. 1.4). В результате проверки работоспособности станции на Ивановском водохранилище произведена серия циклов измерения температуры воды на 4-х горизонтах (Исаев, 1974).

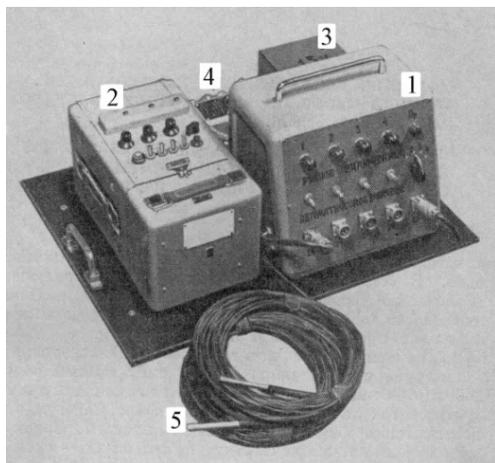


Рис. 1.4. Общий вид станции. 1 – блок автоматики, 2 – осциллограф К-12-21, 3 – источник питания, 4 – измерительные схемы, 5 – датчики температуры.



Рис. 1.5. Части комплекса для регистрации температуры воды в 1977 г. на Белом и Сиверском озерах. 1 – терморезистор ММТ-4; 2 – потенциометр ЭПП-9.

Во второй половине 1970-х гг. при появлении более совершенных приборов информация о температуре воды на отдельных горизонтах выводилась на ленту самописца. Так, в 1977 г. в процессе исследований возможности переброски северных рек в бассейн р. Волги при изучении особенностей термического режима водоемов Северо-Двинской водных систем на Белом и Сиверском озерах датчики температуры (ММТ-4) устанавливали на трех горизонтах с выводом информации на бумажную ленту 3-х канального потенциометра ЭПП-09 (рис. 1.5). Для получения эюры температуры воды использовали измерительный комплекс, состоящий из измерительного блока с термистором П-8-2, компактной электрической лебедки со скоростью опускания троса 10 м/мин и двухкоординатного самописца ПДС-021 (Литвинов, Фомичев, 1979).

Дальнейшая модификация термокаппаметров, проведенная в Институте водных проблем Севера (г. Петрозаводск) с использованием микросхем, позволила существенно уменьшить размеры прибора и элементов питания к нему. Поступив в ИБВВ АН СССР (РАН) в середине 1980-х гг., эти приборы эксплуатировались до начала 2000-х гг. (рис. 1.6). В процессе измерений информацию о температуре и электропроводности воды фиксировали в цифровых кодах, которые затем по тарифовочной таблице пе-

реводили в реальные значения. Точность измерения температуры воды составляла 0.1°C, а электропроводности – 1 мкСм/см. С конца 1980-х до середины 1990-х гг. в Институте активно использовали самописцы течений с блоком непрерывной регистрации температуры воды (АЦИТТ).

С 2006 г. по настоящее время в лаборатории гидрологии для регистрации отдельных гидрофизических характеристик водной среды используют многопараметрические зонды: YSI Model85, YSI Model 30M, YSI Pro Plus (рис. 1.7), позволяющие определить температуру, электропроводность, соленость, содержание растворенного кислорода и его насыщение *in situ* (табл. 1.1). В указанных приборах существует опция приведения электропроводности воды к температуре 25°C. Для приведения электропроводности к 18°C необходимо корректировать значения *in situ* с учетом температурного коэффициента, заимствованного из табл. 1.2, или рассчитанного по формуле:

$$1 / [1 + 0.023 (T_{изм} - 18)].$$

Общая формула приведения измеренной электропроводности к ее удельной величине при 18°C имеет вид:

$$K_{18} = K_{изм} / [1 + 0.023 (T_{изм} - 18)] \text{ (Эдельштейн, 2014).}$$

Кроме того изучение временных изменений температуры воды проводится с помощью автономных мини-регистраторов Пират 2001 (разработка ВНИРО, Левашов, 2003), НОВО Water Temperature Prov2 Data Logger – U22-001, НОВО 64K Pendant Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger UA-001-64, температуры воды и освещенности – НОВО Pendant Temperature/Light 64K Data Logger – UA-002-64. Показания датчиков НОВО и их запуск осуществляется базовой водонепроницаемой станцией НОВО с оптическим интерфейсом USB (рис. 1.8).

Вертикальная серия регистраторов, расположенных на автономной буйковой станции (АБС) или судовой суточной станции, позволяет получать непрерывную информацию о сезонных изменениях термического режима водной толщи и определять основные механизмы формирования поля температуры воды в годовом аспекте. Так, мини-регистраторы Пират и НОВОPendant успешно использовались как на крупных озерах (оз. Севан), так и на малых (оз. Плещеево) для регистрации сезонных и годовых изменений температуры воды, а также выявления внутриволновых процессов (рис. 1.9) (Экология озера Севан, 2010; Поддубный и др., 2020).

К одним из важных вопросов изучения функционирования водных экосистем следует отнести исследования качества воды рек, озер и водохранилищ. При этом надежную регистрацию параметров качества воды и их мониторинг могут обеспечить современные приборы – мно-

гопараметрические зонды качества воды. Начиная с 2021 г. лабораторией гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН на волжских водохранилищах, ряде водоемов Сибири и малых озерах (оз. Плещеево) с использованием зонда ЕХО2 (табл. 1.3) проводятся регистрации отдельных параметров качества воды: температуры, удельной электропроводности, гидростатического давления, рН, окислительно-восстановительного потенциала, мутности, массовой концентрации растворенного в воде кислорода, концентрации хлорофилла, синезеленых водорослей, растворенного органического вещества (рис. 1.10).



Рис. 1.8. Автономные минирегистраторы: а – «Пират 2001» (разработка ВНИРО, Левашов, 2003), б – NOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger – U22-001, в – NOBO 64K Pendant Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger UA-001-64, г – NOBO Pendant Temperature/Light 64K Data Logger – UA-002-64, д – базовая станция NOBO.

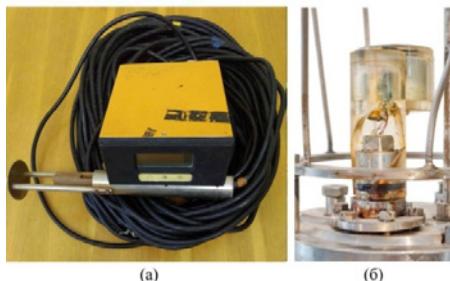


Рис. 1.6. Термокапаметр разработки Института водных проблем Севера РАН (а), блок измерения температуры, электропроводности воды и давления самописца АЦИТТ (б).



Рис. 1.7. Многопараметрические зонды: а – YSI Model 85; б – YSI Model 30M; в – YSI Pro Plus.



(а)



(б)

Рис. 1.9. Установка АБС с регистраторами «Пират 2001» на оз. Севан (а), снятие АБС на оз. Плещеево с самописцами NovoPendant.



(а)



(б)

Рис. 1.10. Многопараметрические зонды качества воды: а – EXO2, б – Aqua TROLL 500.

Таблица 1.1. Основные характеристики многопараметрических зондов и автономных минирегистраторов (κ – электропроводность воды)

Характеристика	YSI-85	YSI-30M	YSI Pro Plus	Пират 2001	U 22-001	UA-001-64	UA-002-64	Марк 603/1
Температура, °C								
Диапазон	-5-(+65)	-5-(+95)	-5-(+70)	-	-40(+70)	-20-(+70)	-20-(+70)	0.0-(+75)
Точность	±0.1	±0.1	±0.2	±0.1	±0.2	±0.5	±0.53	±0.3
Электропроводность, мкСм/см								
Диапазон	0–5000	0–5000	0–2×10 ⁵	-	-	-	-	0–2×10 ⁴
Точность	±0.1–1.0	±0.1–1.0	±1.0	-	-	-	-	±0.05 + 0.025 κ
Растворенный кислород								
Диапазон:								
%	0–200	-	0–500	-	-	-	-	-
мг/л	0–20	-	0–50	-	-	-	-	-
Точность:								
%	±0.1	-	±2–6	-	-	-	-	-
мг/л	±0.01	-	±0.2	-	-	-	-	-
Световой поток, люкс								
Диапазон	-	-	-	-	-	-	0–300	-
pH, ед								
Диапазон	-	-	0–14	-	-	-	-	-
Точность	-	-	±0.2	-	-	-	-	-
Общее содержание твердых растворенных веществ, г/л								
Диапазон	-	-	0–100	-	-	-	-	-

В 2022 г. лаборатория гидрологии и гидрохимии получила Aqua TROLL 500 – универсальный многопараметрический ручной зонд с возможностью ручного либо автономного профилирования, рассчитанный на глубины <100 м. Оснащается четырьмя электродами и центральным очистителем либо заглушкой. В комплектацию входят датчики температуры, электропроводности, pH, окислительно-восстановительного потенциала, мутности, массовой концентрации растворенного в воде кислорода, концентрации хлорофилла. Общение с оператором, основные процедуры калибровки, задание временного интервала, получение координат GPS происходит посредством мобильного устройства на базе Android (Android™: VuSitu) через интерфейс Bluetooth.

1.4.2. Пространственные съемки температуры и электропроводности воды

Первые непрерывные регистрации пространственных изменений поля температуры относятся к району сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС на Ивановском водохранилище. Исследования проводились в июне 1972 г. В качестве датчиков температуры использовались термометры сопротивления типа П-8-2 с диапазоном измерения 0–50°C. Регистрирующая система состояла из мостовых измерительных схем и серийного многоканального светолучевого осциллографа типа К12-24.

Таблица 1.2. Температурный коэффициент для приведения удельной электропроводности воды к 18°C

T, °C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1.706	1.700	1.694	1.687	1.681	1.674	1.668	1.661	1.665	1.648
1	1.642	1.636	1.630	1.624	1.618	1.612	1.606	1.600	1.594	1.588
2	1.582	1.576	1.570	1.565	1.559	1.554	1.548	1.543	1.538	1.532
3	1.527	1.521	1.513	1.511	1.505	1.500	1.495	1.490	1.485	1.480
4	1.475	1.47	1.465	1.460	1.455	1.45	1.445	1.441	1.436	1.431
5	1.427	1.422	1.417	1.413	1.408	1.403	1.399	1.395	1.390	1.385
6	1.381	1.377	1.372	1.368	1.364	1.360	1.355	1.351	1.347	1.343
7	1.339	1.335	1.330	1.326	1.322	1.318	1.314	1.310	1.307	1.303
8	1.299	1.295	1.291	1.287	1.284	1.280	1.276	1.272	1.269	1.265
9	1.261	1.257	1.254	1.250	1.247	1.243	1.239	1.236	1.232	1.229
10	1.225	1.222	1.219	1.216	1.212	1.209	1.205	1.202	1.199	1.195
11	1.192	1.189	1.186	1.183	1.179	1.176	1.173	1.169	1.166	1.163
12	1.160	1.157	1.154	1.151	1.148	1.145	1.142	1.139	1.136	1.133
13	1.130	1.127	1.124	1.121	1.118	1.115	1.112	1.109	1.106	1.104
14	1.101	1.098	1.095	1.093	1.090	1.088	1.085	1.082	1.080	1.077
15	1.074	1.071	1.068	1.066	1.063	1.061	1.058	1.055	1.053	1.050
16	1.048	1.045	1.043	1.040	1.038	1.036	1.033	1.031	1.028	1.026
17	1.024	1.021	1.019	1.016	1.014	1.012	1.009	1.007	1.004	1.002
18	1.000	0.998	0.996	0.993	0.991	0.989	0.987	0.985	0.982	0.980
19	0.978	0.976	0.974	0.971	0.969	0.967	0.965	0.963	0.960	0.958
20	0.956	0.954	0.952	0.950	0.948	0.946	0.944	0.942	0.940	0.938
21	0.936	0.934	0.932	0.930	0.928	0.926	0.924	0.922	0.920	0.918
22	0.916	0.914	0.912	0.910	0.908	0.906	0.904	0.902	0.900	0.899
23	0.897	0.895	0.893	0.892	0.890	0.888	0.886	0.885	0.883	0.881
24	0.879	0.877	0.876	0.874	0.872	0.87	0.868	0.867	0.865	0.863
25	0.861	0.859	0.858	0.856	0.854	0.852	0.85	0.848	0.847	0.846
26	0.844	0.843	0.841	0.840	0.838	0.837	0.835	0.833	0.832	0.830
27	0.829	0.827	0.825	0.824	0.822	0.821	0.819	0.818	0.816	0.814
28	0.813	0.812	0.810	0.808	0.807	0.805	0.804	0.803	0.801	0.800
29	0.798	0.797	0.795	0.794	0.792	0.791	0.789	0.788	0.787	0.786
30	0.784	0.782	0.781	0.779	0.778	0.776	0.775	0.774	0.773	0.771
31	0.770	0.769	0.767	0.766	0.764	0.763	0.762	0.76	0.759	0.758
32	0.756	0.755	0.754	0.752	0.751	0.750	0.748	0.747	0.746	0.745

Таблица 1.3. Основные характеристики многопараметрических зондов качества воды

Характеристики	YSI EXO2	Aqua TROLL 500
Температура, °С		
диапазон	-5-(+50)	-5-(+50)
точность	±0.01	±0.01
Электропроводность, мкСм/см		
диапазон	0-2×10 ⁵	0-35×10 ⁴
точность	±1 в диапазоне 0-1×10 ⁵	±1
Растворенный кислород		
диапазон насыщения, %	0-500	-
точность, %	1.0	-
диапазон содержания, мг/л	0-50	0-60
точность, мг/л	0.1	0.01
pH, ед		
диапазон	0-14	0-14
точность	0.01	0.01
Родамин, мкг/л		
диапазон	0-1000	-
точность	0.01	-
Хлорофилл, мкг/л		
диапазон	0-400	-
точность	0.01 пигмента	-
Мутность, NFU (нефелометрическая единица)		
диапазон	0-4000	1-1500
точность	3-5	0.1 мг/л
Общее содержание твердых растворенных веществ, частей на тысячу		
диапазон	-	0-350
точность	-	0.1
Аммоний-ион, мг/л		
диапазон	-	0-10000
точность	-	0.01
Нитрат-ион, мг/л		
диапазон	-	0-40000
точность	-	0.01
Хлорид-ион, мг/л		
диапазон	-	0-150000
точность	-	0.01

Запись температуры воды производилась с борта лодки на двух горизонтах. Датчики температуры воды опускались за борт на штангу, которая крепилась к борту лодки специальным кронштейном. Максимальное заглубление нижнего датчика составляло 2 м, верхний датчик во избежание искажающего влияния пузырьков воздуха, образующихся при движении за штангой, находился на глубине 0.4 м. Одновременно с датчиками

температуры для регистрации пройденного расстояния на штанге крепилась вертушка ГР-11. Использование в качестве лага вертушки ГР-11 с сигналом через каждый оборот крылатки давала точность, при определении расстояния не менее $\pm 5\%$. В результате исследования был выявлен широкий спектр пространственных масштабов колебаний температуры, связанных предположительно с положением основной струи потока теплых вод (Литвинов, Исаев, 1974).

Дальнейшая модификация приборов непрерывной записи температуры и электропроводности воды при буксировке позволила проводить с 1977 по 1991 гг. крупномасштабные съемки полей этих параметров на разнотипных водоемах (оз. Белое, Нарочанские озера, водохранилища Волжско-Камского каскада). Информация выводилась на самописцы ЭПП-09, КСП-4, а впоследствии – на микро-ЭВМ «Искра-1256» (рис. 1.11). Завершающей разработкой автоматизированного измерительного оборудования в ИБВВ АН СССР стал комплекс, включающий устройства вертикального зондирования водоема, непрерывной записи при буксировке, вертикальной многоканальной регистрации температуры и управляющей микро-ЭВМ «Искра-1256». С помощью этого комплекса были получены суточные изменения температуры воды, новые данные по интенсивности прогрева водной массы Рыбинского водохранилища, распределения температуры и электропроводности воды на полигонах водоема (Литвинов, Фомичев, 1979; Литвинов и др., 1994).

В процессе использования буксируемой аппаратуры выявились некоторые существенные особенности регистрации температуры воды. Применительно к Рыбинскому водохранилищу скоростные термические съемки занимали от 1 до 3 сут и в отдельные временные периоды совпадали с фазами интенсивного прогрева водоема в течение суток. В связи с этим возникала необходимость приведения температуры воды к единому фиксированному моменту времени. Основным приемом приведения температуры к такому моменту времени служил анализ ее изменений в точках пересечения разрезов. Образующиеся в точках пересечения разрезов за счет суточных изменений температуры ее невязки устранялись с использованием итерационного метода релаксации или метода групповой релаксации (Литвинов, Ясовеев, 1987). Следует отметить, что относительная ошибка предложенного метода варьировала в пределах 0–42 %, и в среднем составляла 17 %.

Крупномасштабные съемки водохранилищ и отдельных их частей (полигонов) закончились к 1991 г. Непрерывные регистрации температуры и электропроводности воды внутренних водоемов возобновились только спустя четверть века (с 2015 г.) в период проведения экспедиций

по волжским водохранилищам от Твери до Волгограда. В качестве измерительной аппаратуры использовались микропроцессорные кондуктомеры-солемеры «Марк-603» с датчиком ДП-3 и «Марк-603/1» с датчиками ДП-015, ДП-15. Датчики помещались в заборную штангу на горизонт 0.5–1 м. Кондуктометр «Марк-603» (версия 2, точность измерения $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$), подключается к микрокомпьютеру на основе ROCK 4A/4B на базе RK3399(2018) (<https://wiki.radxa.com/Rock4>) и управляется Ubuntu 14.04 desktop с подключенным приемником GPS. Интервал измерения одна минута. Данные с кондуктометра и с GPS поступают в микрокомпьютер и коллекционируются на карту памяти (рис. 1.12). Характеристики регистраторов приведены в табл. 1.1.

Измерения проводились по ходу движения судна круглосуточно. Надо отметить, что указанными приборами так же можно проводить измерения на отдельных горизонтах водной толщи. В приборах помимо регистрации электропроводности *in situ* имеется опция приведения ее к температуре 25°C . Для работы на мелководье или ограниченных акваториях с катера, или на моторной лодке было сконструировано специальное крепление к борту плавсредства для размещения датчиков.

1.5. Наблюдения над течениями

Исследование течений как важной абиотической характеристики водной среды может рассматриваться с двух точек зрения. В первом случае изучаются особенности формирования разных видов течений при наборе гидрометеорологических факторов как на характерных участках водоемов, так и в целом на всей акватории водоема (горизонтальная и вертикальная циркуляция вод). Во втором случае оценивается воздействие выявленных особенностей крупно-, мезо- и микромасштабной структуры течений на распределение и перемещение живых организмов.

Основными механизмами, формирующими структуру течений, выступают приток в водоем, скорость и направление ветра, воздействие волновых движений, рельеф дна.

1.5.1. Метеорологические наблюдения

Метеорологические наблюдения проводятся в начале гидрологических работ и обязательно – при измерении параметров течений. Инструментально определяются: температура воздуха, скорость и направление ветра; визуально облачность, горизонтальная видимость, атмосферные явления (осадки, туман и т.д.). Температура воздуха определяется аспирационным психрометром на высоте 2 м над водной поверхностью. Психрометр располагается за пределами искажающего влияния нагретых предметов.

Наблюдения ведутся с наветренного борта судна. Отсчет психрометра проводится через 4 мин, после пуска aspirатора.

Скорость ветра измеряется ручным (МС-13) или индукционным (АРИ-49) анемометром также на высоте 2 м над поверхностью воды. Измерения проводятся в том месте, где ветер не искажается влиянием судовых надстроек (обычно на носу судна). Время выдержки анемометров 600 с. Судовой анемометр М-61 после включения позволяет определить скорость ветра осредненную за пятиминутный интервал.

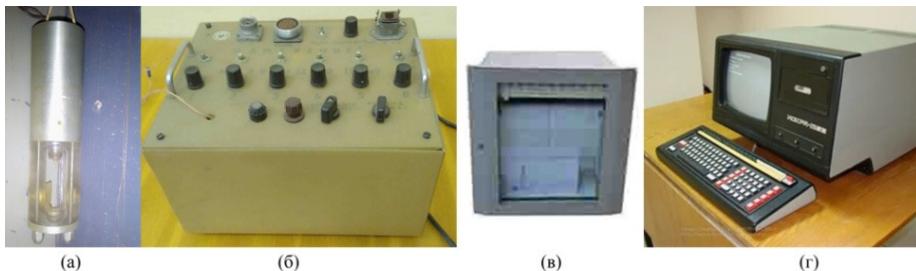


Рис. 1.11. Приборы для регистрации температуры и электропроводности воды по ходу судна: а – заборный датчик, б – блок управления, в – КСП-4, г – «Искра-1256».

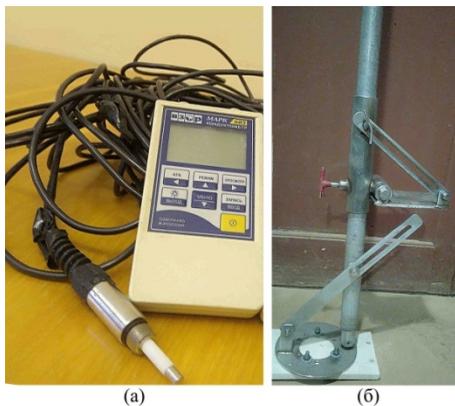


Рис. 1.12. Микропроцессорные кондуктомер-солемер «Марк-603» (а), заборное крепление датчиков для маломерного судна (б).

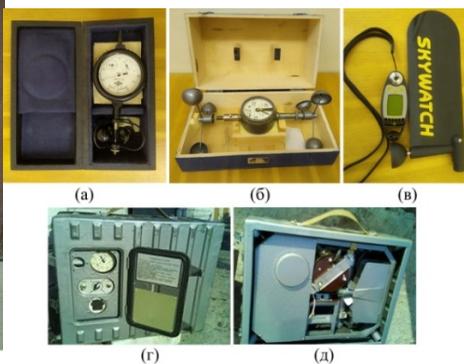


Рис. 1.13. Метеорологические приборы: а – ручной анемометр МС-13, б – судовой анемометр М-61, в – портативная метеостанция GEOS № 11, г – десантный метеорологический комплект (ДМК).

Для измерения направления ветра может использоваться вымпел из легкой нити и компас или буссоль, по которым определяется среднее

направление ветра с точностью до 5 град. При работе с судна после ориентации его на якорной станции по ветру направление последнего можно определить по судовому компасу.

В полевых условиях комплекс метеорологических параметров может успешно регистрироваться с применением десантного метеорологического комплекта (ДМК – в настоящее время производится усовершенствованная модель ДМК-01). ДМК предназначен для измерения мгновенной скорости ветра, направления ветра, относительной влажности воздуха, температуры воздуха, атмосферного давления, метеорологической дальности видимости. В монтажный комплект входит мачта высотой 4 м, состоящая из треног, ствола из набора трубок и растяжек. На стволе мачты с помощью хомутиков крепится черный экран. На верхнем конце мачты устанавливается датчик скорости и направления ветра. Датчик температуры и влажности помещается на специальном кронштейне на высоте 2 м. Кабель длиной 10 м соединяет датчики, расположенные на мачте, с измерительным устройством. Комплекс ДМК успешно применялся в экспедиционных рейсах на Рыбинское и Куйбышевское водохранилища в процессе работ по программе «Итеркосмос» и оценке воздействия подводной добычи нерудных строительных материалов на экосистему водоемов.

В современный период в лаборатории гидрологии и гидрохимии для метеорологических измерений используется портативная метеостанция GEOS№11, позволяющая регистрировать температуру воздуха, влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра (рис. 1.13). Основные характеристики рассмотренных метеорологических приборов приведены в табл. 1.4.

1.5.2. Наблюдения над волнением

Наблюдения над волнением дают возможность оценить степень ветрового перемешивания водной массы водоема. При этом считается, что глубина ветрового перемешивания равна половине длины волны. В период интенсивно развивающегося ветрового волнения и продолжительного действия ветра глубина ветрового перемешивания может быть равна средней длине ветровых волн.

Наблюдения над волнением могут проводиться инструментально и визуально. Наиболее простые инструментальные наблюдения, дающие возможность получить характеристику основных элементов волн, выполняются с использованием волномерных вех. Такие наблюдения целесообразно проводить в прибрежных участках водоемов, где ведутся стандартные гидробиологические исследования (описание стационарного мелководного пункта наблюдений будет приведено ниже).

При наблюдениях в открытой части водоема проводится визуальная оценка степени волнения и состояния водной поверхности. Эти оценки выполняются по двум шкалам (шкала степени волнения и шкала состояния поверхности водоема), единым для морей, озер и крупных водохранилищ. Кроме того, в открытой части водоема желательно проводить визуальную оценку длины волны. Ориентировочно оценить длину волны можно по сравнению с длиной корпуса судна либо другого плавсредства, с которого проводятся работы. При этом длиной волны считается расстояние между двумя последующими гребнями или ложбинами волн.

Таблица 1.4. Основные характеристики метеорологических приборов

Характеристика	МС-13	М-61	ДМК	GEOS №11
Скорость ветра (V), м/с				
диапазон	1–20	1.5–40	1.5–40	0–84
погрешность	$\pm(0.3+0.05V)$	$\pm(0.3+0.05V)$	$\pm(0.3+0.05V)$	± 2
Направление ветра, град				
диапазон	–	–	0–360	0–360
погрешность, %	–	–	± 10	± 10
Температура воздуха, °С				
диапазон	–	–	–55–(+45)	–40–(+85)
погрешность	–	–	± 0.8	± 0.5
Влажность, %				
диапазон	–	–	30–100	0.1–100
погрешность	–	–	± 7	± 2
Атмосферное давление, мм. рт. ст.				
диапазон	–	–	560–780	7.5–825
погрешность	–	–	$\pm 3.3–1.4$	0.5

1.5.3. Измерения параметров течений

Общие сведения. Течение в водохранилищах и озерах следует рассматривать как векторную величину, определяемую двумя характеристиками – направлением и скоростью. Основными видами течений, обуславливающими макроциркуляцию вод водоема, следует считать стоковые и ветровые. Размещение пунктов наблюдений над течениями по акватории водоемов определяется площадью и морфометрическими особенностями.

При отсутствии сведений о течениях размещение вертикалей проводится по всей акватории с учетом морфометрических особенностей. Например, в водохранилищах при определении зоны распространения стоковых течений постоянные вертикали должны быть расположены вблизи гидроузлов и в руслах затопленных рек.

Назначение горизонтов наблюдений определяется задачами работ и неоднородностью распределения по вертикали характеристик течения. Число горизонтов зависит также от глубины вертикали. При глубинах ≤ 10 м

горизонты изменения могут быть назначены через 2 м либо 0.5–2–5–7 м и у дна. При глубинах до 25 м – 0.5–2–5–7–10–15–20 м и у дна.

Наблюдения над стоковыми и ветровыми течениями несколько отличаются по приемам и методам. Приемы исследования стоковых течений могут быть разделены на прямые (инструментальные) и косвенные (с применением химических определений). Над ветровыми течениями проводятся только инструментальные наблюдения.

При исследовании стоковых течений наблюдения следует вести при максимальных и минимальных расходах вод, поступающих в водоем и вытекающих из него. В водохранилищах, при наличии суточного регулирования расходов воды через гидросооружения, необходимо проводить наблюдения на суточных станциях. Измерения должны проводиться каждые 2 ч. Разовые наблюдения могут дать совершенно неправильное представление о характере движения вод. В местах существующих или предполагаемых выпусков сточных или подогретых вод наблюдения должны выполняться при разной гидрометеорологической обстановке. Оптимальным вариантом является выполнение многосуточных станций с использованием самописцев течений.

Ранние исследования. Начальный период изучения режима течений в волжских водохранилищах (Рыбинском, Горьковском, Куйбышевском) относится к 1954–1957 гг. Исследования на Рыбинском водохранилище с 1954 по 1956 гг. проводились научно-исследовательской биологической станцией «Борок». Поскольку организовывать стандартные разрезы для систематических наблюдений за течениями станция не имела возможности, большинство наблюдений выполнялось попутно с биологическими исследованиями во время экспедиционных судовых рейсов по водохранилищу. В зависимости от характера течений они измерялись разными способами: вертушками Ж-3 (стоковые течения), морской вертушкой простой (ВМ) и модернизированной (ВММ), поплавками Митчелла, поверхностными поплавками, использовалась бутылочная почта (рис. 1.14). Кроме стандартных заводских приборов применялись и самодельные – для регистрации слабых течений в зимних условиях брался загруженный дробью пенопластовый шарик с удельным весом, несколько превышающим 1.0, подвешенный на тонкой леске. По отклонению шарика в лунке удавалось определить направление и наличие течения (Кренке, 1958).

Летом 1957 г. при проведении комплексной экспедиции на э/с «Наука» по волжским водохранилищам и р. Волге от Рыбинской ГЭС до Сталинграда одной из важных задач гидрологической группы было изучение распределения температуры и прозрачности воды, отбор проб на определение мутности, а также скоростей течения. Измерения

скорости течения на речных участках выполнялись вертушкой Ж-3, а в открытых частях водохранилищ – ВММ с облегченной лопастью. Количество станций на разрезах варьировало от 3 в узких частях водоемов до 5 в их широких частях (Буторин, 1958).

На начальном этапе исследований водохранилищ постоянно проводился поиск приборов для надежного измерения параметров течений при различных гидрологических условиях. Отсутствие в то время соответствующего гидрологического оборудования вынуждало использовать проверенные временем морские измерители течений. Так, в апреле 1960 г. Для изучения скоростного режима Рыбинского водохранилища в русловой части Волжского плеса была испытана электробифилярная вертушка (ЭБВ-7), являющаяся дистанционным прибором и предназначенная для измерения скорости и направления течения в поверхностных слоях моря. Чувствительность прибора составляла 1.5–2.0 см/с. Одновременно с установкой самописца в 250 м от скоростной вертикали на пойме устанавливался водомерный пост с самописцем уровня «Валдай». Для контроля измерялись скорости течения с помощью вертушек Ж-3 и ВММ (Буторин, Эдельштейн, 1961). Спустя год в Волжском плесе Рыбинского водохранилища был испытан на предмет дальнейшего применения самописец течений БПВ-2р конструкции Ю.К. Алексева (речной вариант) (рис. 1.15). Этот прибор был более совершенен для изучения параметров течений в автономном режиме на суточных и буйковых станциях. Вывод информации осуществлялся на бумажную ленту в виде отпечатков скорости и направления течения через заданный интервал времени (5, 10, 15, 20, 30 или 60 мин). Чувствительность прибора с крылаткой из органического стекла достигала 1.5–2.0 см/с. Точность отчета направления течения на отпечатке могла составлять 1 град (Буторин, Литвинов, 1962). В результате апробации вертушек ЭБВ-7 и БПВ-2р были получены предварительные сведения о взаимосвязи между уровнями, скоростью течения и сбросными расходами Угличской ГЭС. Кроме того, сделан вывод о существенных перспективах использования самописца БПВ-2р для изучения структуры течений в водохранилищах.

Как уже отмечалось, период конца 1950-х – начала 1960-х гг. ознаменовал собой поиск надежных приборов и методов для изучения скоростного режима внутренних водоемов. Одной из задач такой работы был поиск приборов для измерения малых скоростей течения в центральных плесах водохранилищ. Таким прибором мог стать термогидрометр конструкции В.А. Рымши, усовершенствованный в экспериментальной мастерской ИБВВ АН СССР (рис. 1.15). Термогидрометр состоял из датчика, соединительного кабеля, блока питания и

измерителя термотока – переносного гальванометра ГПЗ-47. В результате тарировки прибора в круговом лотке наибольшая чувствительность датчика приходилась на диапазон скоростей от 0 до 3 см/с. Натурные испытания термогидрометра проводились в Центральном плесе Рыбинского водохранилища весной и летом 1960 г. и зимой 1961 г. В результате был сделан вывод о невозможности использования прибора в навигационный период, так как для измерений требовалась жесткая неподвижная основа. Тем не менее в зимних условиях испытания термогидрометра прошли успешно и дали положительные результаты (Эдельштейн, 1963).

В первой половине и середине 1960-х гг. были практически полностью отработаны методики регистрации параметров течений на различных участках водохранилищ. Среди ряда приборов предпочтение отдавалось ВММ, вертушке ГР-42, поплавкам с погружаемым парусом и самописцу БПВ-2р (рис. 1.14б; 1.15б, в). По аналогии с организацией морских буйковых станций (АБС) лабораторией гидрологии ИБВВ АН СССР успешно внедрялась в практику установка АБС с серией самописцев БПВ-2р на разных горизонтах применительно к мелководным условиям водохранилищ (Литвинов, 1968). Система вертушек поддерживалась поверхностным бумом, а в дальнейшем – притопленным бумом для исключения колебательных движений за счет ветрового волнения. На мелководных участках водоемов или придонных слоях глубоководной зоны в качестве опоры использовались жесткие треноги (рис. 1.16).

Непрерывные записи скорости и направления течений вертушками БПВ-2р позволяли анализировать длинные ряды значений с выявлением пространственно-временной изменчивости течений и их статистических характеристик (Литвинов 1969, 1975, 1977). Исследования временной изменчивости течений в последующие два десятилетия проводились в основном на Рыбинском водохранилище, как в глубоководной, так и в мелководной зоне. Мелководные станции располагались на открытом и защищенном мелководье в окрестностях п. Борок.

Особое место в гидрологических исследованиях (в том числе и течений) занимали работы на полигонах с целью изучения мезомасштабной структуры полей гидрофизических и гидробиологических характеристик. К первым исследованиям какого плана следует отнести комплексные гидролого-гидробиологические работы по обследованию отдельных нагульных скоплений рыб и занятых ими участков на Рыбинском водохранилище летом 1964–1965 гг. Полигоны занимали площадь 1 км² и окантуривались вехами. Перед началом работ проводилась батиметрическая и грунтовая съемки.

Два раза в сутки в пределах полигона и за его границей на различных горизонтах определялись температура и электропроводность воды, скорость и направление течения, рН и растворенный кислород (Поддубный и др., 1968).

Второй этап изучения функционирования локальной структуры экосистемы водохранилищ на полигонах и микрополигонах стартовал спустя 20 лет и продолжался с 1984 по 1991 гг. Полигоны располагались в западной, юго-западной и южной частях Рыбинского водохранилища и на Волжско-Камском участке Куйбышевского водохранилища.

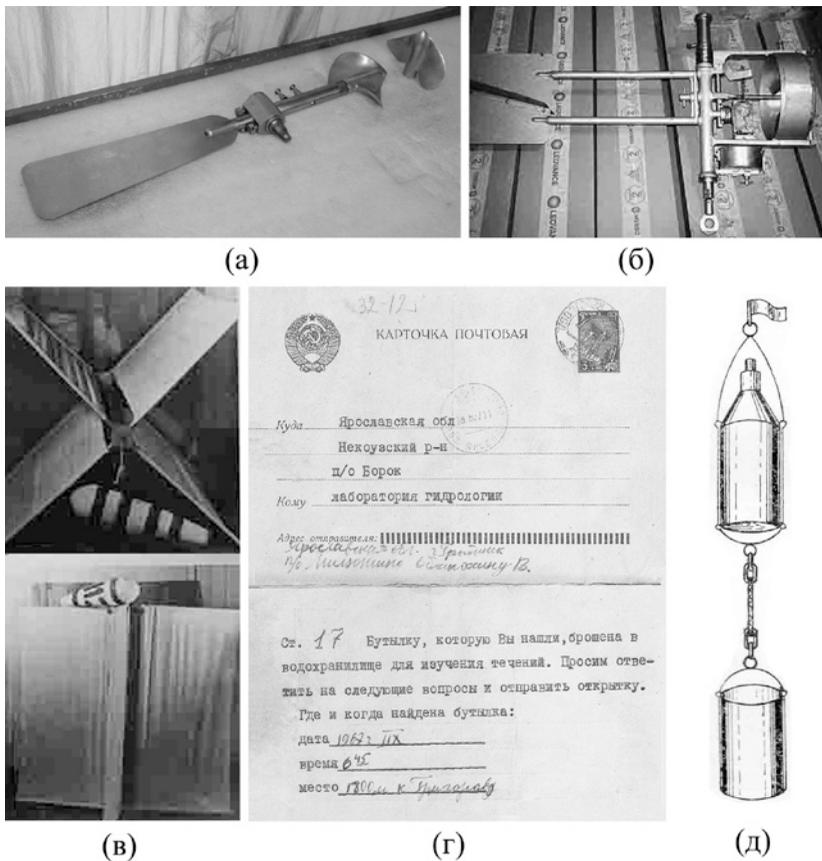


Рис. 1.14. Гидрометрические вертушки: а – Ж-3, б – морская модернизированная (ВММ), в – поверхностные полавки, г – карточки бутылочной почты, д – полавки Митчелла.

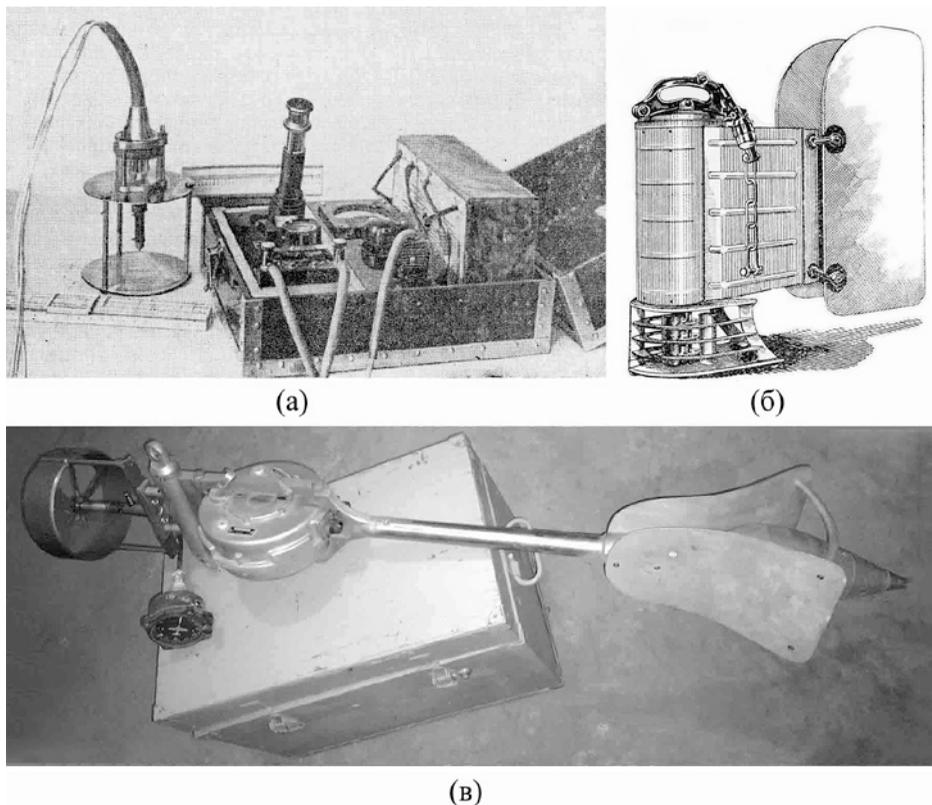


Рис. 1.15. Термогидрометр (а), самописец течений БПВ-2р (б), гидрометрическая вертушка ГР-42 (в).

Работы проводились по двум основным направлениям: программе «Интеркосмос» совместно с рядом институтов Академии наук и исследованию воздействия подводной добычи нерудных строительных материалов на биологические ресурсы водохранилищ. В процессе работ использовался указанный ранее автоматизированный измерительный комплекс для регистрации температуры и электропроводности воды, измерители течений ГР-42, БПВ-2р и полученный в лабораторию гидрологии автономный цифровой измеритель течений и температуры воды (АЦИТТ). Первичная информация скоростных съемок температуры и электропроводности воды, регистрируемая на ленте самописца КСП-4 (впоследствии посредством ПЭВМ «Искра-1256» на магнитной ленте с помощью программного комплекса «Сбор»), обрабатывалась с применением преобразователя графиков Ф 018 и пакетов прикладных программ. Полученные

данные измеренных гидрофизических параметров разносились по маршруту движения суда и станциям полигона с дальнейшим построением их горизонтального и вертикального распределения (Экологические факторы..., 1993).

Продолжительные экспедиции по водохранилищам Волжского каскада закончились к 1993 г. К этому же времени завершились комплексные работы на мелководьях Волжского плеса Рыбинского водохранилища.

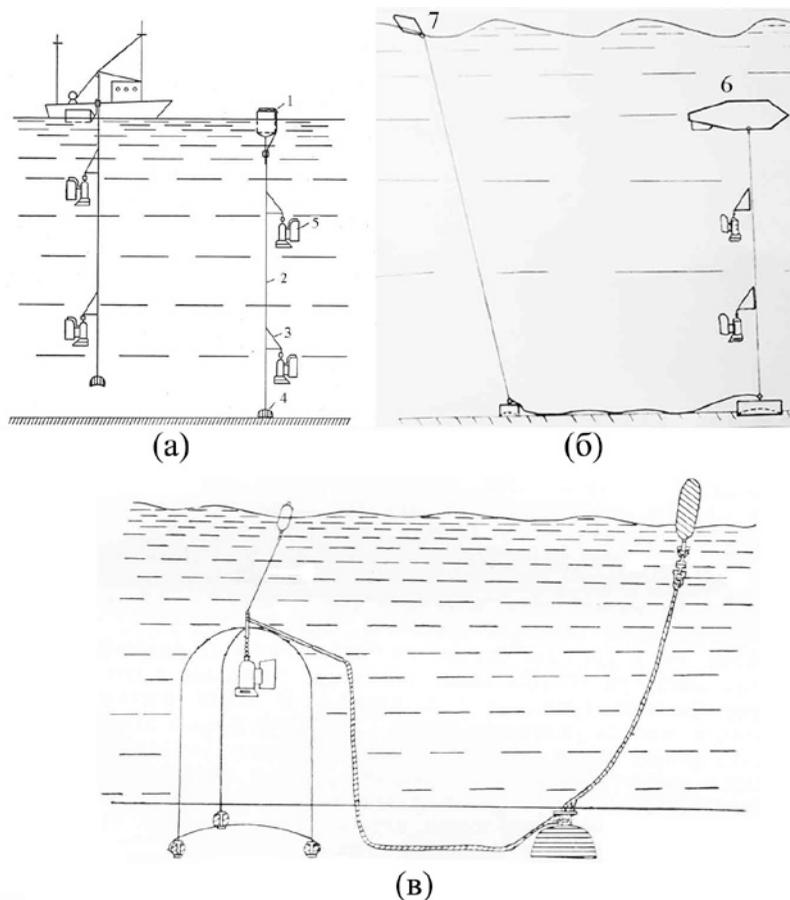


Рис. 1.16. Схемы постановки буйковых станций: а – с поверхностным буем, б – с приотпленным буем, в – на треноге у дна. 1 – металлический или пенопластовый буй, 2 – буйреп, 3 – кронштейны для подвешивания приборов, 4 – якорь, 5 – приборы, 6 – приотпленный буй, 7 – сигнальный боек.

В 1992 г. была получена последняя информация о скоростях и направлениях течений на АБС в пределах открытого и защищенного мелководья в весенне-летний период. К середине 1990-х гг. были выведены из эксплуатации самописцы течений БПВ-2р и АЦИТТ (рис. 1.17а). В кратковременных единичных рейсах в 1998–2000 гг. на Ивановское и Угличское водохранилища в качестве регистратора течений использовалась вертушка ГР-42.

Одновременно с крупномасштабными судовыми исследованиями на волжских водохранилищах проводились и работы по изучению экосистем малых озер, в частности, оз. Плещеево. Наряду со съемками температуры и электропроводности воды на закрепленных станциях регистрировались скорости и направления течений свободно дрейфующими поплавками. В целях уточнения структуры водного баланса озера осуществлялись сезонные измерения расходов воды в реках Трубез и Векса. Скорости течения на реках измерялись гидрометрической вертушкой ВГ-1-120/70 с регистратором скорости течения ИСТ 1-0.06/120/70. Время измерения скорости задавалось 60 или 100 с (рис. 1.17б).

Современные исследования. В начале 2000-х гг. встало на ремонт э/с «Академик Топчиев». Стандартные рейсы на Рыбинское водохранилище до 2005 г. выполнялись на э/с «Ареал». Район экспедиционных работ ограничивался водохранилищами Верхней Волги. Экспедиции проводились в основном за счет грантов РФФИ и хозяйственных работ. В этот период до начала возобновления рейсов по волжским водохранилищам в 2015 г. акцент гидрологических работ сместился на изучение гидрологического режима малых рек и малых озер Ярославской и Вологодской областей. Основной задачей таких работ наряду с термическими съемками было измерение расходов воды рек и параметров течений в их устьевых областях. Скорость и направление течения определялась вертушкой ВГ-1-120/70 с регистратором скорости течения ИСТ 1-0.06/120/70, микрорасходомером «МКРС», а также поплавками с GPS-логгерами, позволяющими отследить траекторию их перемещения во времени (рис. 1.18).

Поплавки с GPS-логгерами, оснащенные поверхностными и глубинными парусами, успешно применялись при выявлении особенностей движения воды в пределах различных аквальных комплексов: проточного руслового пруда на малой реке, устьевой области малой реки, приплотинного участка Чебоксарского водохранилища (Поддубный и др., 2011, 2013; Герасимов и др., 2014). Во всех случаях поплавочные измерения показали индивидуальность и сложность гидродинамической структуры, присущей каждому из указанных водоемов. Начиная с 2014 г. сотрудники лаборатории гидрологии и гидрохимии самостоятельно и совместно

с учеными из других организаций (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН и физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) перешли на новый этап изучения структуры течений во внутренних водоемах с использованием акустических доплеровских профилографов. Применительно к речным условиям (р. Хопер) оценивалась роль гидрофизических факторов и, в частности течений, на распределение рыб. Скорость течения по поперечному сечению реки измерялась с помощью доплеровского профилографа Sontek MiniADP, буксируемого на плавучей платформе (рис. 1.19а). Максимальная глубина профилирования составляла 6.2 м, разрешение ячейки профилирования 0.15–0.25 см (Gerasimov et al., 2019). Этот же прибор использовался при изучении структуры течений в пределах защищенного зарастающего макрофитами мелководья в Волжском плесе Рыбинского водохранилища. Конечной задачей исследования была оценка водообмена мелководья при сезонных изменениях гидрометеорологического режима водоема (Poddubnyi et al., 2021). Летом 2014 г. совместно с физическим факультетом МГУ проводилась комплексная гидрологическая съемка оз. Плещеево. Данные (скорость и направление течения, температура и электропроводность воды, растворенный кислород) регистрировались зондом-профилографом Aanderaa Data Instruments AS SeaGuard RCM 9 (рис. 1.19б).

В 2019–2021 гг. Sontek MiniADP совместно с поплавками, а в последствии (весна 2021 г.) с акустическим профилографом ИСТ-1М (рис. 1.19в), был основным прибором для исследования течений в водоподводящем канале Костромской ГРЭС в рамках хозяйственного задания по оценке эффективности рыбозащитного устройства, препятствующего попаданию молоди рыб в насосные станции ГРЭС (Герасимов и др., в печати).

В 2022 г. акустический профилограф ИСТ-1М обеспечивал измерения скорости течения в русловой зоне рек Волги и Камы при проведении комплексного рейса по водохранилищам Волжско-Камского каскада. В этом же году лаборатория получила еще один современный прибор – SonTek HydroSurveyor с прошивкой SonTek River Surveyor (рис. 1.19г), который был опробован осенью 2022 г. на оз. Плещеево.

Таким образом, в настоящий момент лаборатория гидрологии и гидрохимии располагает самым современным оборудованием для проведения разномасштабных исследований структуры течений во внутренних водоемах. Наряду с современными приборами не теряют актуальности в использовании и более старые вертушки – МКРС и ИСТ 1-0.06/120/70. В ряде случаев оказываются незаменимыми поплавки с разноглубинными парусами.



Рис. 1.17. Самописец течений АЦИТТ (а) и гидрометрическая вертушка ВГ-1-120/70 с регистратором скорости течения ИСТ 1-0.06/120/70.

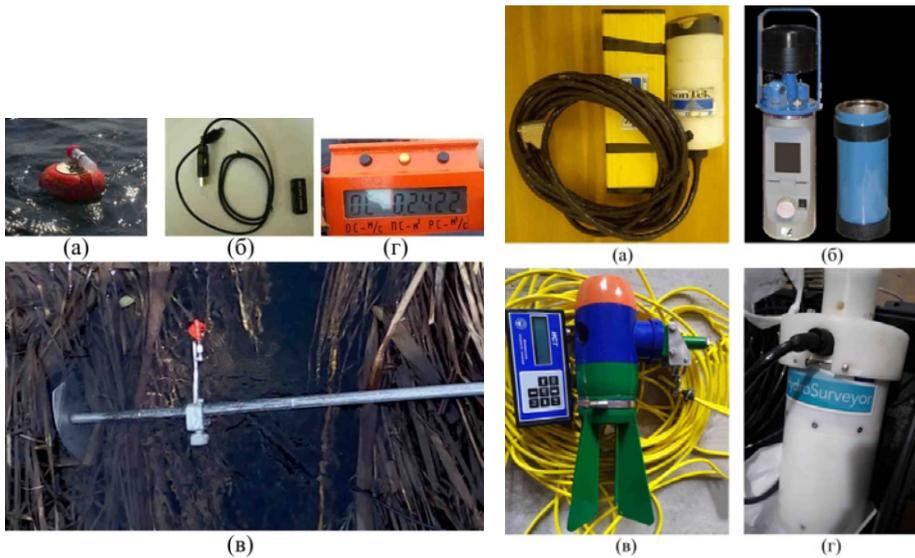


Рис. 1.18. Поверхностный поплавок с разноглубинным парусом и боксом для GPS логгера (а), GPS логгер (б), вертушка МКРС (в), блок регистрации МКРС (г).

Рис. 1.19. Регистраторы течений: а – доплеровский профилограф Sontek Mini ADP, б – зонд-профилограф Aanderaa Data Instruments AS Sea Guard RCM 9, в – акустический профилограф ИСТ-1М, г – профилограф SonTek Hydro Surveyor.

Ошибки при измерении параметров течений. Достоверность результатов регистрации параметров течений зависит от точности выполняемых измерений, что позволяет отдавать предпочтение наиболее надежным методам, исключая измерения, имеющие небольшую точность. Ошибками измерения течений могут быть: инструментальные, методики и условий наблюдений, а также дискретности наблюдений. Последние возникают при осреднении данных измерений по площади или во времени. Кроме того, ошибки делятся на систематические и случайные. К систематическим относятся ошибки, которые при многократном измерении в одних и тех же условиях сохраняются постоянными или меняются по определенному закону. Такие погрешности исключаются при проверке приборов или учитываются при обработке результатов наблюдений. Случайные ошибки при многократном измерении не остаются постоянными.

Учет таких ошибок, как правило, осуществляется статистическими методами (Исследование течений..., 1972).

Основные характеристики измерительных приборов, используемых в настоящее время в лаборатории гидрологии и гидрохимии при изучении течений, приведены в табл. 1.5. Измерение параметров течений поплавками с подповерхностным и глубинным парусом целесообразны на небольших акваториях при наличии слабых скоростей течения, а также с целью получить траектории перемещения водных масс. Средние ошибки измерения течений поплавками могут составлять: по скорости 2–3 см/с, по направлению 5–10 град, максимальные – соответственно 5 см/с и 30 град (Исследование течений..., 1972). Широкое использование профилографа ИСТ-1М (гидрологические посты, береговые сооружения, мосты, плавсредства) предопределяет и разные погрешности измерения скорости и направления течений. Регистрации с жесткой опоры не подверженной влиянию ветра и волн будут отличаться наименьшими ошибками в соответствии с допускаемой относительной погрешностью (табл. 1.5). Зондирование прибором с плавсредств предполагает наличие более значительных ошибок. Проведение измерений параметров течения с экспедиционных судов с установкой последних минимум на два якоря не реально, т.к. в случае комплексных рейсов отбор проб на станциях осуществляется при постановке судна только на один якорь. В этом случае при ветре около 5 м/с рысканье судна может достигать более 90 град. При таком неустойчивом его положении ошибка направления течения увеличивается до ± 80 –120 град при ошибке скорости до 20 см/с. Измерения с лодки предпочтительней, с возможностью ее установки на два якоря. При отсутствии более точных сведений о порядке возникающих ошибок можно допустить, что в случае средних по силе ветров (5–

8 м/с) ошибка наблюдения направления не будет превышать $\pm 20-30$ град, а ошибка скорости – $\pm 3-5$ см/с (Исследование течений..., 1972). Наличие сильного стокового течения в речных плесах водохранилищ позволяет использовать профилограф ИСТ-1М с судна, установленного на один якорь с ошибками регистрации находящимися, вероятно, в пределах указанных выше диапазонов.

Таблица 1.5. Основные характеристики современных гидрометрических приборов

Характеристика	ИСТ 1		МКРС	Sea Guard RCM 9	ИСТ-1М	Sontek Mini ADP	SonTek Hydro Surveyor
	ВГ-1-120/70*	ИСТ-1					
	Скорость, см/с						
Диапазон	6–500	6–500	5–500	0–300	1–500	0–1000	0–1000
ошибки:							
относительные, %	$\pm 18-1.5$	$\pm 8-0.1$	$\pm 4-2$	–	± 1	± 1	–
абсолютные, см/с	$\pm 1.1-7.5$	± 0.5	$\pm 0.2-10$	–	± 0.1	± 0.5	0.2
	Направление, град						
Диапазон	–	–	–	0–360	0–360	–	0–360
ошибки:							
относительные, %	–	–	–	–	–	–	–
абсолютные, град	–	–	–	–	± 2.5	–	± 2

На реках измерения скорости течения проводятся вертушками ВГ-1-120/70 с регистратором скорости течения ИСТ 1-0.06/120/70 и МКРС. В случае малых глубин вертушки фиксируются на штанге, а на глубоких реках – на тросе с грузом. В зависимости от поставленных задач на скоростных вертикалях могут выполняться одноточечные или многоточечные измерения (Карасев, Шумков, 1985). При жестком закреплении вертушек на скоростных вертикалях в первом приближении погрешности измерений должны соответствовать указанным в табл. 1.5.

Акустические доплеровские профилографы Sontek Mini ADP и SonTek Hydro Surveyor предназначены для измерения расхода воды, построения профиля донной поверхности, измерения глубины и скорости водного потока на речных поперечных разрезах, а также на выбранных водных сечениях озер и водохранилищ.

В речных условиях на вновь выбранных участках при выполнении измерений расходов воды необходимо соблюдать следующие условия: избегать резких переломов профиля водного сечения; следить за отсут-

ствием выраженной пульсации скорости течения и систематической косоструйности потока, не более 20 град; избегать наличие поймы с протоками и рукавами, а также естественных или искусственных преград; избегать участков с сильной замутненностью воды; следить за отсутствием водной растительности в самом створе и крупных валунов, превышающих по размеру 1/3 глубины потока. Для измерения расхода воды следует выполнить несколько пересечений потока, получив таким образом ряд значений расхода воды. Относительное отклонение расхода воды по результатам каждого измерения от среднего значения не должно выходить за пределы 5 %.

Эти значения характеризуют случайные погрешности при измерении расхода воды и зависят от способа движения по створу, режима измерения скоростей и характеристик самого потока (его турбулентности). При проведении работ допускается незначительное превышение скорости судна (лодки) над скоростью потока только на участках реки, где скорость течения меньше 0.2 м/с, и (или) в случаях выполнения измерений на водотоках шириной более 300 м, когда время перемещения по створу составляет более 10 мин (Руководящий документ..., 2012).

Отсутствие в настоящее время достаточных данных измерений скорости и направления течений профилографами в озерах и водохранилищах не позволяет однозначно сформулировать возможные погрешности регистрации параметров течений применительно к этим водоемам. Вместе с тем существуют отдельные исследования, касающиеся анализа погрешностей доплеровского профилографа и оценки надежности данных его измерений в морских условиях (Сильвестрова и др., 2015; Кассашиер, Кошеева, 2016). Авторами выявлено, что относительная погрешность в определении скорости течения определяется погрешностью в определении скорости звука, которая, в свою очередь, зависит от температуры воды, ее солености и давления. В случае фиксированного значения скорости звука, соответствующего средним значениям температуры, солености и давления в слое профилирования максимальная относительная погрешность измерения скорости течения не будет превышать 4.3 %. Величина крена судна при качке до 15 град может увеличивать погрешность измерений на 0.26 %. Кроме того, установлено, что некорректное измерение буксируемым профилографом параметров течения при малой скорости последнего (<0.1 м/с) связано с значительной скоростью движения судна (лодки). Для более корректной оценки погрешностей измерения характеристик течения профилографом работы целесообразно проводить одновременно с поплавочными измерениями на разных глубинах.

1.6. Стационарные пункты наблюдений

Как уже отмечалось выше, к одному из основных видов комплексных гидрологических исследований относятся регулярные стационарные наблюдения у берега и в открытой части водоема на специально сооруженных гидрологических постах. Так, в целях повышения качества и увеличения объема информации о состоянии некоторых физических характеристик воздуха, воды и донных отложений на защищенном мелководье Волжского плеса Рыбинского водохранилища вблизи базы ИБВВ АН СССР 5 мая 1971 г. был сооружен специальный измерительный пункт, оснащенный автоматизированной измерительной системой со светолучевыми осциллографами (рис. 1.20). На начальной стадии эксплуатации пункта велись измерения температуры воздуха, температуры воды на поверхности и дне мелководья, уровня воды и атмосферного давления (Буторин, Смирнов, 1972). Метеорологические параметры регистрировались судовой дистанционной гидрометеорологической станцией ГМ-6, колебания уровня – самописцем «Валдай», температура воды – термокаппаметром, грунта – донным термошупом, позволяющем измерять температуру донных отложений в слое грунта до 1 м (Бакастов, 1965). На автономном пункте в середине и второй половине 1970-х гг. устанавливались самописцы течений БПВ-2р. Исследования на мелководном измерительном пункте продолжались до начала 1980-х гг.

К стационарным пунктам наблюдений в открытой части водоемов (в основном – Рыбинское водохранилище) можно отнести изучение структуры течений в зимний и навигационный периоды. В первом случае самописцы течений устанавливались в толще со льда на довольно продолжительное время. В безледный период параметры течений измерялись на АБС. Приборы устанавливались на отдельных горизонтах или на притопленном буге, или на треноге в придонном слое. Продолжительность измерений на АБС составляла от недели до 1–2 месяцев (рис. 1.16).



Рис. 1.20. Стационарный мелководный пункт наблюдений в Волжском плесе Рыбинского водохранилища.

1.7. Определение характеристик донных отложений

1.7.1. Направления исследований донных отложений водохранилищ

Началом формирования грунтового комплекса водохранилищ следует считать с момента их заполнения водой. Отрывочные сведения о донных отложениях (ДО) водохранилищ Верхней Волги имеются в работах И.Ф. Овчинникова (1950), А.В. Живаго (1954), А.В. Гавемана (1955). Подробное изучение ДО стал проводить с 1955 г. В.П. Курдин (1960, 1961), который выполнил две грунтовые съемки на Рыбинском водохранилище с интервалом в 10–12 лет и рекогносцировочные рейсы на других водохранилищах Волжского каскада по мере ввода их в эксплуатацию (табл. 1.6). Изучение особенностей формирования грунтового комплекса водохранилищ осуществлялось несколькими этапами.

Таблица 1.6. База данных грунтовых съемок (I–VI) водохранилищ Волги*

Водохранилище	Год заполнения	Годы грунтовых съемок					
		I	II	III	IV	V	VI
Иваньковское	1937	1957	1968	1975	1991	2012	2014–2022
Угличское	1940	1958	1968	1977	1991	2012	2014–2022
Рыбинское	1941	1955	1965	1978	1994	2009	2014–2022
Горьковское	1955	1962	1980	1992	1999	2010	2014–2022
Чебоксарское	1981	1981	1991	2001	2010	2020	2014–2022
Куйбышевское	1955	1961	1983	1993	2002	2017	2014–2022
Саратовское	1967	1968	1985	1990	2006	2020	2014–2021
Волгоградское	1958	1960	1985	1990	2014	2015	2016–2021

Примечание. «*» – образцы проб в коллекции лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН.

Задачи первого этапа включали: выделение основных типов ДО, определение их физико-химических характеристик, распределение ДО в ложе водоема, анализ пространственно-временных изменений и путей дальнейшей трансформации ДО в пределах экосистемы водохранилищ. Итогом этого периода стала монография «Донные отложения верхневолжских водохранилищ» (Буторин и др., 1975), которая послужила методологической основой для проведения подобных работ на Волге, Каме, Нижнем Доне и Днепре.

Начиная с 1975 г. изучение ДО водохранилищ Волги продолжалось с интервалом в 10–20 лет (табл. 1.6). В течение второго этапа наряду с указанными выше задачами исследовались условия формирования грунтового комплекса, запасы и скорости накопления органического вещества и биогенных элементов, изучалась роль донных отложений в биотическом кругово-

роте экосистемы. Этап завершен работами «Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях верхневолжских водохранилищ» (Законнов, 1983), «Балансы биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги» (Законнов, Зиминова, 1984) и «Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Волги» (Законнов, 1993).

После 1985 г. (3-ий этап) наметилась геоэкологическая тенденция в исследовании ДО равнинных водохранилищ, цель которой заключалась во всесторонней характеристике осадкообразования в водохранилищах Волги и оценке его гидроэкологической роли в функционировании водных экосистем. На этом этапе систематизировались материалы грунтовых съемок волжских водохранилищ, оценивалась роль гидродинамических и геоморфологических процессов в формировании ложа водоемов, выявлялись географические закономерности пространственно-временной трансформации распределения и накопления донных отложений, рассчитывались запасы и скорости накопления органического вещества, биогенных элементов, тяжелых металлов, вредных поллютантов в донных отложениях, составлялись балансы взвешенных наносов и биогенных элементов, характеризующих внутриводоемный, бассейновый и планетарный круговорот вещества и энергии. Проведенный многоплановый анализ полученной информации по донным отложениям позволил унифицировать схемы происхождения и формирования грунтового комплекса водохранилищ равнинных территорий, а также уточнить классификацию донных отложений.

Важной составной частью исследований было установление особенностей взаимодействия процессов осадкообразования и качественного состава донных отложений с биотой водохранилищ. Следует отметить, что полученные материалы легли в основу прогноза путей изменения грунтового комплекса в водохранилищах волжского каскада при различных вариантах естественного и антропогенного воздействия на гидрологический режим и условия эксплуатации гидросооружений.

Таким образом, геоэкологический подход в изучении функционирования пресноводных экосистем, предусматривающий выявление причинно-следственных взаимосвязей между водосбором, водными массами, донными осадками и биотой, предполагает реализацию следующих направлений:

1. *Гидролого-геоморфологического* – для оценки роли главных источников поступления осадкообразующего материала в результате переработки берегов, ложа, сплавин, эрозионных процессов на водосборе и с поступлением растворенных взвешенных и влекомых наносов с речным стоком (Законнов и др., 1999, 2007, 2021, 2022).

2. *Седиментологического* – для расчетов площадей распределения ДО и темпов накопления пространственно-временного изменения структуры и стратиграфии горизонтов донных наносов в кернах с использованием математических, картографических, палеомагнитных, теплофизических методов и диатомового анализа (Законнов, Поддубный, 2002; Куражковский и др., 2002; Законнов, 2007)

3. *Гидрохимического* – для выяснения локализации, распределения и накопления органического вещества, биогенных элементов, тяжелых металлов (в том числе ртути), полихлорированных бифенилов, стойких органических загрязнений, нефтепродуктов и т.д. с учетом их взаимодействия по трофическим цепям и возможностью утилизации и выведения из круговорота веществ, посредством естественных природных процессов (Герман, Законнов, 2003; Герман и др., 2010; Udodenko et al., 2018).

4. *Гидробиологического* – для выявления количественных связей абиотических и биотических факторов среды, оценки местообитаний гидробионтов, установления связей физико-химических характеристик грунтов с сукцессионными процессами макрофитов, растительными пигментами, диатомовыми комплексами, токсичностью, численностью бактерий на частицах различного гранулометрического состава, интенсивностью микробиологических процессов и т.д. (Романенко, Законнов, 1990; Сигарева и др., 2004; Баканов и др., 2006).

1.7.2. Методы сбора и обработки материала по донным отложениям

Местоположение станций, приборы, отбор проб. На начальном этапе исследований гидрологические станции располагались по акватории водоема с таким расчетом, чтобы не оставлять «белых пятен» на дне. Топографической основой для проведения съемок были «Атласы единой глубоководной системы европейской части РСФСР» масштаба 1:10 000–25 000, изданные в разное время.

Местоположение станций определялось теодолитным пеленгованием с обязательным промером глубин с учетом НПУ, по судовой обстановке и береговым ориентирам, а впоследствии с помощью спутниковых навигаторов. Согласно «Наставления...» (1957), периодичность проведения грунтовых съемок должна быть не менее 10 лет, в противном случае возникает трудность в определении изменений в составе, структуре и толщине осадка. Последующие съемки выполнялись по интервалам глубин на 20–30 станциях. В целях уменьшения величины случайной ошибки, вызванной неравномерностью толщины отложений на каждой станции, их количество от съемки к съемке постоянно увеличивалось.

Работа с трубками ГОИН-1 и 1.5 м, ТНХЛ и дночерпателями различной конструкции (рис. 1.21) осуществлялась как вручную, так и с помощью механических и электрических лебедок на якорных стоянках, на малом ходу судна или в дрейфе по закрепленной сетке станций, предусматривающей наличие разрезов от берега к берегу и через характерные формы рельефа дна – затопленные русла рек, склоны, подводные банки, пойменные участки. При обследовании мелководий пробы отбирались на обсохших участках в шурфах, а под водой – трубчатым штанговым дночерпателем (модификация Ф.Д. Мордухай-Болтовского).

В последнее время стали применяться современные методы проведения грунтовых съемок. Например, с помощью эхолотов Lowrance LMS-240 (350A), позволяющих определить тип и мощность осадка и лота с храпцом (прибора, изготовленного в экспериментальной мастерской при ИБВВ РАН п. Борок), для контрольных промеров глубин и отбора поверхностного слоя отложений толщиной 5 см и площадью захвата грунта 6.5×8.5 см (~ 55 см²).

Описание образца начиналось с визуального определения типа, цвета и консистенции, а также толщины керна и наличия слоистости и других вкраплений. Отбор проб для определения физико-химических характеристик (растительных пигментов, диатомового комплекса, стойких органических соединений, тяжелых металлов и т.д.) производился послойно (по 1, 2, 5 см) из кернов с ненарушенной структурой, которую обеспечивали латунные вкладыши диаметром 4 см, непрерывно или с горизонтов 0, 10, 20 см и т.д. до маркирующегося слоя. Маркерами являлись хорошо сохранившаяся дерновина на почве, лесная подстилка или элементы размытой почвы с характерной структурой и остатками корней, русловой песок (рис. 1.22).

Пробы грунта предварительно перемешивались, консервировались высушиванием на воздухе в чашках Петри. Коагуляция мельчайших частиц и диспергация их с помощью кислотного воздействия или кипячения в течение 30 мин на результаты гранулометрического анализа заметного влияния не оказывала (Законнов, 1980). Впоследствии камеральная обработка проб проводилась с сырыми образцами.

Физические характеристики. Физические характеристики донных отложений определяются в соответствии с перспективой их дальнейшего использования для оценки процессов седиментации, переотложения (трансседиментации), генетической принадлежности, а также для определения функциональных связей с гидробионтами, депонированными в грунтах растительными пигментами, химическими показателями, палеомагнитными характеристиками и др. Главными информационно-несущими элементами

во всех расчетах являются объемная масса, влажность и гранулометрический состав донных отложений. Причем, объем ДО выражается в трех формах: объемной массе при натуральной влажности; объемной массе воздушно-сухой; объемной массе абсолютно-сухой.

Методика полевых и лабораторных работ при этом заключается в следующем. Керн, отобранный с помощью грунтовой трубки ГОИНа, разделяется на отрезки по 5 см. Образец помещается на монтажный столик, где в него вдавливаются стальная цилиндрическая высечка объемом 14 см³, имеющая режущую кромку. Излишек грунта с верхней части цилиндрика срезается тонким ножом. В высечку вставляется поршень, с помощью которого проба переводится в бюкс с постоянным весом. Такое устройство позволяет точно фиксировать объем пробы в полевых условиях, не нарушая природной структуры (рис. 1.23а).

Для устранения потерь в весе за счет испарения воды (что важно при определении объемной массы натуральной влажности) закрытый бюкс до взвешивания помещается в эксикатор. В случае определения объемной массы песчаного грунта, пробу, находящуюся в высечке, необходимо смачивать забортной водой, иначе неизбежны ошибки в определении объемной массы натуральной влажности за счет потери песком свободной влаги. Перед анализом приборы и инструменты должны быть помыты.

После первого взвешивания бюкс открывается, образец высушивается на открытом воздухе, а бюкс с пробой взвешивается вторично для определения воздушно-сухой объемной массы. Для получения абсолютно сухой объемной массы производится последующее взвешивание с предварительной сушкой пробы в сушильном шкафу при температуре 100–105°C в течение 2 ч.

При отсутствии определений объемной массы в расчетах используется установленная ранее зависимость между объемной массой абсолютно сухого грунта (γ , г/см³) и потерей в весе при прокаливании (ППП, %). Коэффициент множественной корреляции между ними высокий и составляет 0.89–0.90. Эта зависимость имеет гиперболический тип и аналитически может быть выражена уравнением: $\gamma = 2.34(\text{ППП})^{-0.71}$. Потеря в весе сырого образца при просушивании, отнесенная к первоначальному весу и умноженная на 100, составляет естественную влажность пробы в %:

$$W = (P_1 - P_2) / P_1 \times 100 \%,$$

где W – влажность пробы, P_1 – вес сырой навески, P_2 – вес навески после высушивания. Определение натуральной и гигроскопической влажности, максимальной молекулярной влагоемкости проводится общепринятыми методами (Наставление..., 1957).



Рис. 1.21. Оборудование для регистрации и отбора проб донных отложений: а – грунтовые трубки, б – эхолот Lowrance LMS-240, в – отбор проб с помощью аквалангиста, г – отбор проб дночерпателем.



Рис. 1.24. Электромагнитная просеивающая установка «Analysette-3».



Рис. 1.22. Керны донных отложений, отобранных на Рыбинском водохранилище.

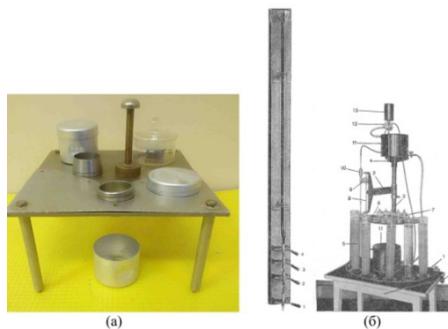


Рис. 1.23. Монтажный столик (а), фракциометр, пипетка (б).

Для гранулометрического анализа применяются гидравлические методы, основанные на зависимости между размером зерен и скоростью осаждения их в воде (Рухин, 1957). В основе этого способа лежит формула Стокса:

$$V = 0.222gr^2(d_1 - d)/\mu,$$

где V – скорость осаждения частиц сферической формы в см/с; g – ускорение силы тяжести; r – радиус частиц в мм; d – удельный вес воды; d_1 – удельный вес частиц; μ – вязкость воды (зависящая от ее температуры).

Механический анализ грунтов производится методом «отмучивание – фракциометр – пипетка» с выделением фракций: 1–0.5, 0.5–0.2, 0.2–0.1, 0.1–0.05; 0.05–0.01, 0.01–0.005, 0.005–0.001 и меньше 0.001 мм, усовершенствованный В.П. Курдиным (1959) и упрощенный В.В. Законновым (1980) (рис. 1.23б). При подготовке проб пресноводных ДО к механическому анализу рекомендуется кипятить их в течение 3 ч для полной дезагрегации частиц. Некоторые исследователи сокращают время кипячения до 30 мин, считая его достаточным для устранения механического сцепления между частицами и лучшего сохранения их «природных» размеров (Наставление..., 1957; Курдин, 1959). Если предполагается исследование химического состава выделяемых фракций, то кипячение не проводится. В этом случае может возникнуть вопрос о величине погрешностей в механическом составе ДО, определенном без предварительного кипячения пробы.

Гранулометрический состав донных отложений при естественной влажности определяется ситовым методом мокрого рассеивания через сита с диаметром отверстий от 2 до 0.05 мм с помощью электромагнитной просеивающей установки «Analysette-3», фирмы Альфред Фрич (Alfred Fritsch&Co), а также с прецизионными ситами в диапазоне частиц от 100 до 5 микрон (мкм) (Свальнов, Алексеева, 2005) (рис. 1.24). При этом может применяться как подробный анализ по размерным фракциям, принятым в гидрологии (Наставление..., 1957), так и сокращенный – с выделением фракций песка (>0.1 мм), алеврита (0.1–0.01 мм), пелита (0.01–0.001 мм) и субколлоидной (<0.001), используемый в океанологии (Страхов и др., 1954) (табл. 1.7). Данные гранулометрического анализа изображают в виде столбчатых или круговых диаграмм, которые упрощают их математическую обработку.

Другим часто применяемым способом является построение на одном рисунке нескольких суммарных (кумулятивных) кривых по нарастающему принципу. Полученные кривые дают возможность определить наиболее простые гранулометрические коэффициенты, называемыми квантильными.

При использовании квартилей средний размер зерен (медиана M_d) выбирается таким образом, чтобы относительно него половина зерен, слагающих образец, была более крупной, а половина более мелкой. Для вычисления коэффициента сортировки (S_0), характеризующего степень абразии зерен по величине, и коэффициента асимметрии (S_k), демонстрирующего симметричность распределения зерен относительно среднего, находят величину двух (первой и третьей) квартилей. Относительно первой квартили (Q_1) три четверти образца сложены более крупными зернами и одна четверть – более мелкими, по отношению к третьей квартили (Q_3) три четверти зерен имеют меньший размер и одна четверть – больший. Коэффициент сортировки S_0 при использовании системы квартилей равен:

$$S_0 = \sqrt{Q_3/Q_1}, \text{ а коэффициент асимметрии:}$$

$$S_k = Q_1 Q_3 / M_d^2,$$

где M_d – медиана, Q_1 , Q_3 – квартили. Значение медианы может быть определено аналитически, но обычно ее находят по нарастающей кривой. Для этого на чертеже проводят горизонтальную линию, соответствующую 50 %. Абсцисса точки ее пересечения с кривой и будет являться медианой.

Таблица. 1.7. Классификация частиц (Страхов и др., 1954; Наставление..., 1957)

Подфракции	Диаметр частиц фракций, мм						
	Глина (субколлоид- ный)	Ил (пелитовый)	Пыль (алеური-то- вый)	Песок	Гравий	Галька	Валуны
Мелкие	<0.01	0.001–0.005	0.01–0.05	0.1–0.2	1–2	10–20	>100
Средние	–	–	–	0.2–0.5	2–5	20–50	–
Крупные	–	0.005–0.01	0.05–0.1	0.5–1.0	5–10	50–100	–

Важнейшей особенностью нарастающей кривой является возможность определить по ней содержание иных фракций по сравнению с теми, в которых выражен гранулометрический анализ. Средний диаметр частиц (d_{cp} , мм) или медианный размер данного образца определялся по формуле:

$$d_{cp} = (ak_1 + bk_2 \dots hk_n)/100,$$

где $a, b \dots h$ – количество частиц в %; k – коэффициенты, k_1 – (1.0–0.5) – 0.75, k_2 – (0.5–0.2) – 0.35 ... k_n – (<0.001) – 0.001. Гранулометрические коэффициенты позволяют сравнивать гранулометрический состав различных типов ДО и способствуют реставрации картины их происхождения.

Толщина донных отложений. Как уже отмечалось выше, толщина накопившихся донных отложений определяется отбором кернов грунтовыми трубками или бурением до поверхности коренных грунтов озерной котловины или ложа водохранилища. При этом слабым звеном в определении толщины донных отложений являются вторичные пески. Благодаря гранулометрическому анализу на установке «Analysette-3» (Законнов и др., 2021), а в полевых условиях с помощью набора сит (Наставление..., 1957) эта проблема может быть успешно решена. Вторичные пески, подвергшиеся гидродинамическому воздействию стоково-ветровых течений и волн, имеют определенную гидравлическую крупность, которая отличается от механического состава террас и береговых склонов. Как правило, их дисперсность состоит из двух и трех вершинных пиков распределения – песка, алеврита и пелитового материала.

Идентификация наличия вторичных песков в донных отложениях выполняется следующим образом. Для сравнения образцы проб отбираются по 10 см из кернов: берегового откоса, пляжного бечевника, полосы прибоя и через 1 м глубины от уреза до границы распространения песчаных наносов на трансектах различных участков водоема. Вторичный осадочный материал, как правило, состоит из одной фракции, соответствующей размывающей скорости течения в виде одного пика с высокой сортировкой $S_0 < 2$. Средняя толщина слоя вторичного песка рассчитывается по количеству станций отбора проб на трансекте для каждого участка. По результатам расчетов средняя толщина оказалась в узком диапазоне от 10 до 15 см, с максимальными значениями до глубины 3 м в устьях рек, каналов и заливов. В совокупности с тонкодисперсными отложениями ошибка определения осадконакопления составляла 10–30 % (в среднем 20 %), что вполне приемлемо для такого рода расчетов.

Химические характеристики. Химический состав ДО и в первую очередь наличие в них органических веществ определяет экологические условия местообитания гидробионтов. Определение содержания органики проводится методом сжигания в муфельной печи (Аринушкина, 1970). Растертые и пропущенные через сита с диаметром 0.25 мм пробы прокаливаются при температуре 450–500°C, если просеивание не предполагается, то грубобразмолотые образцы сжигаются при 550–600°C. Последующее деление полученного значения на коэффициент (2) дает приблизительное содержание органического углерода, определенного методом мокрого сжигания по Тюрину (Аринушкина, 1970).

На протяжении длительного периода времени накопление биогенных элементов (БЭ) в грунтах оценивалось, исходя из общего запаса осад-

ков, накопившихся в водохранилищах за время их существования, и концентраций биогенных элементов в них. Для определения в грунтах общего углерода ($C_{\text{общ}}$) использовался метод сухого сжигания (Алекин и др., 1973). С целью повышения точности определения для анализа применялись навески грунта от 15 до 25 мг. Конечный результат определялся титрованием раствора $\text{Ba}(\text{OH})_2$ в поглотителях Реберга 0.01N раствором HCl при постоянной продувке очищенным воздухом (точность метода $\pm 5\text{--}10\%$). Углерод карбонатов определялся на той же установке путем 30-минутного разрушения 0.05N раствором H_2SO_4 (точность метода $\pm 5\%$) (Бикбулатов и др., 1969). Общий азот определялся микродиффузионным методом после сжигания по Кьельдалю (точность $\pm 10\%$) (Трифенова, Калинина, 1973); общий фосфор – персульфатным методом (точность $\pm 5\%$) (Алекини др., 1973; Бикбулатов, 1974). В дальнейшем содержание общего углерода и азота определялось на CHN-1-анализаторе с точностью изменений 0.3 % (рис. 1.25а).



Рис. 1.25. Элементарный анализатор С, Н, N (а), атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС-3 (б).

Для расчета аккумуляции биогенных элементов в отложениях на каждой станции вычислялась средняя по высоте колонки концентрация органического углерода, общего азота и общего фосфора. Средняя для всех типов ДО концентрация БЭ в диапазоне глубин принималась для определения их общего запаса.

Аккумуляция элементов в ДО на участках рассчитывалась как сумма их запасов на всех интервалах глубин данного участка. Суммарная ошибка запаса БЭ составляет около 20 % (Зиминова, Законнов, 1980).

С целью районирования участков дна водохранилищ, подверженных антропогенному загрязнению, с помощью методов нормирования концентраций тяжелых металлов (ТМ) по литию и многомерной стати-

стики использовались подвижные формы металлов, т.е. формы, извлекаемые 0.5 N HCl и валовые формы ТМ, полученные путем полного разложения образца грунта в присутствии плавиковой, хлорной и азотной кислот (Прокофьев и др., 1981). Концентрации тяжелых металлов определялись методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборах ААС-1 и ААС-3 (рис. 1.25б). Для градуировки использовались стандартные образцы почв. Рентгенофазовый анализ отмученных ДО выполнялся по методике Н.И. Горбунова (1972) на приборе ДРОН-1.5. Емкость поглощения определялась по Гедройцу (Агрохимические методы исследования..., 1975). В работе использовались также специальные программы статистической обработки данных методом главных компонент и иерархического кластерного анализа.

Аномальные концентрации элементов (ТМ) оценивались с помощью следующих методов: статистического, в котором используется параметр $x + 2\sigma$ (x – средняя концентрация, σ – стандартное отклонение), концентрации, превышающие $x + 2\sigma$ (или $x + 3\sigma$), считаются аномальными; сравнения с фоновыми седиментами (обычно для этой цели используются сланцевые глины) (Nolte, 1988); нормирования концентраций микроэлементов по фоновому индикаторному элементу (ИЭ), например Al, Fe, Si (Hirst, 1962; Loring, 1990). Статистически выделенные аномалии концентрации металлов легко интерпретировать лишь тогда, когда очевидны источники загрязнения (промышленные предприятия или рудные месторождения). Более высокий уровень оценки аномалий основывается на определении естественного геохимического фона.

1.7.3. Составления балансов взвешенных наносов и биогенных элементов

Балансовые расчеты являются исходными в выявлении главных факторов в круговороте вещества, обуславливающих его накопление и расход в водоемах. Основой для составления седиментационного баланса является водный баланс. Уравнение седиментационного баланса имеет вид: $\sum Z = \sum I - \sum P$, где изменение запаса взвешенных наносов ($\sum Z$) определяется как разность приходных ($\sum I$) и расходных ($\sum P$) его статей за расчетный период. Сумма приходных статей – это поступление осадкообразующего материала из различных источников, к которым относят сток взвешенных и влекомых наносов с основной рекой (Волгой) и боковых притоков, абразионные процессы на берегах и в ложе, эрозия на водосборе на межприточных площадях, эоловые осадки, продукция фитопланктона, высшей водной и наземной растительности, ливневые и сточ-

ные воды с селитебных территорий, химическое выпадение солей в осадок. В расходной части баланса – сброс взвесей через замыкающие гидросооружения и забор на водопотребление (питьевое водоснабжение, орошение, технические нужды) и аккумуляция на дне.

В связи с трудностями определения отдельных статей и малой их доли в балансовых расчетах уравнение баланса взвешенных веществ принято таким, как в работах Н.А. Зиминовой и В.П. Курдина (1974):

$$H + A + П = O + C + B,$$

где H – сток речных наносов, A – абразионные процессы, $П$ – продукция фитопланктона и макрофитов, O – осадконакопление, C – сброс взвесей через гидросооружения, B – содержание взвесей в водной массе в конце расчетного периода. Последняя статья в расчет не включалась, так как эта величина ничтожно мала по сравнению с остальными статьями баланса. При наличии данных по абразии берегов и всех остальных статей баланс считается замкнутым, с невязкой от 3.2 до 10.7 %. Но чаще всего величина абразионного материала определялась по разности известных расходных и приходных статей, тогда все ошибки расчетов списывались на эту статью. Слабым звеном в расчетах осадконакопления является недоучет количества наносов в мелководной части водоема. Распределение и накопление осадков здесь чрезвычайно неравномерно, т. к. они постоянно находятся под воздействием гидродинамических процессов, способствующих их размыву, переотложению и аккумуляции.

По оценке Н.А. Ярославцева (1975), в результате гидродинамической активности водных масс (вдольбереговые, ветровые и стоковые течения, влияния волнения на дно) из прибрежной и мелководной зоны изымается примерно 50 % обрушенного берега за счет вымывания тонкодисперсной фракции. Неучет тех или иных статей, ошибки в их определении и некоторые допущения в расчетах делают балансы взвешенных веществ ориентировочными. Основным источником поступления взвесей в водоем – абразия берега и эрозия ложа (от 55 до 80 %) сглаживают ошибки других статей и отражают процесс малого круговорота вещества в водоемах.

Расчет проводился по формулам: для органического углерода – $(П_p + П_б + П_с + П_о + П_с + B) - (C + D + A) = \pm \Delta H$; для общего азота – $(П_p + П_б + П_с + П_о + B_a + K) - (C + A) = \pm \Delta H$; для общего фосфора – $(П_p + П_б + П_с + П_о + B_\phi) - (C + A) = \pm \Delta H$, где – поступление биогенных элементов ($П_p$ – речной сток, $П_б$ – продукты абразии ложа и берегов, $П_с$ – сточные воды непосредственно в водоем, $П_о$ – атмосферные осадки на зеркало водоема, $П_с$ – продукция фитопланктона и высшей водной растительности, B – бактериальная ассимиляция CO_2 , B_a , B_ϕ – выделение из донных отложений азота и

фосфора, K – азотфиксация); – расход биогенных элементов (C – сброс через гидросооружения, D_c – деструкция органического вещества в воде и донных отложениях, A – аккумуляция в донных отложениях); – невязка баланса – $\pm \Delta H$.

При этом использовались как прямые определения C , N и P в тех или иных источниках (по сезонам и в многолетнем аспекте), так и переходные коэффициенты. Например, отношение кислорода перманганатной окисляемости к $C_{орг}$ равно 1 (Скопинцев и др., 1974), бактериальная ассимиляция CO_2 составляет 6 % продукции (Романенко, Кузнецов, 1974), деструкция OB в воде ($mg\ O_2/l$ в сутки) пересчитывалась по углероду и на весь объем водохранилища (Романенко и др., 1976); деструкция OB в осадках рассчитывалась

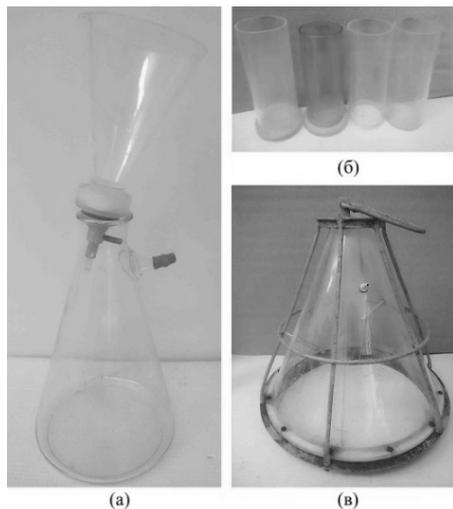


Рис. 1.26. Фильтровальная колба Бунзина с воронкой (а), седиментографы – ловчие стаканы (б), воронка (колпак) для сбора пузырьков газа, азота и фосфора, выделяющихся со дна (в).

По другим водохранилищам Волги имеются более короткопериодные балансы (Выхристюк, Варламова, 2003).

1.7.4. Определение содержания взвешенных веществ

Одновременно с изучением грунтового комплекса велись исследования водных взвесей в водохранилищах. Это позволило дать характеристику и количественную оценку одного из важнейших факторов формирования ДО и выразить осадконакопление как функцию соотношения прихода и расхода взвешенного вещества (Буторин и др., 1975). При исследовании

исходя из площади илистых отложений и принималась как средняя за вегетационный период (Романенко, Кузнецов, 1972); выделение азота и фосфора из отложений составляет соответственно, $13\ mg\ N\ m^{-2}\ сут^{-1}$ (Трифонова, 1974) и $0.8\ mg\ P\ m^{-2}\ \cdot\ сут^{-1}$ (Трифонова, Былинкина, 1977), а скорость азотфиксации равна в воде $0.5\ г\ N\ m^{-2}$, а в донных отложениях – $0.4\ г\ N\ m^{-2}$ за сезон (Кузнецов и др., 1974) (рис. 1.26).

Балансы биогенных элементов в верхневолжских водохранилищах замкнутые, т.к. все статьи прямо или косвенно определялись и рассчитывались по лабораторным и натурным экспериментам и наблюдениям.

взвешенных веществ в качестве основного метода определения количества взвесей в пробах воды был принят метод мембранной фильтрации – мембранный фильтр № 4, диаметр пор 0.9 мкм (Зиминова, 1963). Выбор метода обусловлен спецификой объекта исследования – малыми количествами и большой дисперсностью взвесей в водохранилищах. Бумажные фильтры в таких условиях малопригодны, так как пропускают значительную часть взвесей. Применение мембранных фильтров обеспечивает тонкую очистку воды и возможность параллельного изучения количества и состава взвесей благодаря способности данных фильтров просветляться под действием некоторых маслянистых веществ. При наличии массового материала фильтрационный метод из-за значительной трудоемкости комбинировался с нефелометрическим. Светорассеяние определялось на нефелометре модели НФМ, имеются и другие модификации как отечественные, так и зарубежные (рис. 1.27).

В зимних условиях на Рыбинском водохранилище для сбора взвесей применялся метод ловчих стаканов позволивший определить темпы седиментации взвесей в этот период (Зиминова, Трифонова, 1963). Используемый зимой метод ловчих стаканов свободен от ошибок за счет быстрого разложения органического вещества и выедания его зоопланктоном, а также за счет вымывания взвесей из ловушки при волнении. Исследование состава взвесей проводилось по трем направлениям: определение органического вещества во взвесах, за которое условно принималась потеря при прокаливании при температуре 500°C; определение общего азота микродиффузионным методом Конвея (Трифонова, Былинкина, 1977); выявление основных ингредиентов, входящих в состав взвесей, путем микроскопирования окрашенных фильтров.



Рис. 1.27. Работа с нефелометром.

Глава 2. Анализ гидрологических данных

2.1. Физико-географическая характеристика бассейна

Ход гидрологических процессов в континентальных водоемах в большей степени определяется физико-географическими условиями и геоморфологией их бассейнов. Поэтому перед тем, как приступить к сбору материалов и, тем более, к обработке гидрологических данных, необходимо составить представление о рельефе, геологическом строении, климате и почвенно-растительном покрове исследуемого бассейна.

Климатические особенности бассейна обычно могут быть характеризованы данными о средних многолетних температурах воздуха, теплого и холодного периодов и отдельных месяцев, максимальных и минимальных температурах. Необходимы также сведения об испарении и количестве осадков (средних многолетних и распределении их по сезонам).

Наряду с особенностями рельефа, геологического строения, климатических условий и т.д. важную роль в составлении физико-географической характеристики бассейна играет развитие гидрографической сети (густота гидрографической сети) и характеристика питания рек бассейна (снеговое, ледниковое, дождевое, грунтовыми водами). Характеристика стока рек обычно может быть представлена модулем стока (среднегодовой расход реки в литрах, деленный на площадь водосбора в квадратных километрах).

Комплекс гидрометеорологической информации может быть получен из следующих источников:

1) данные о среднемесячной температуре воздуха на метеостанциях (МС) в бассейне Рыбинского водохранилища копируются с сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»;

2) ежедневные данные о температуре воздуха и количестве осадков за период с 1948 г. по настоящее время на МС Ярославской области находятся на сайте pogodaklimat.ru/monitor;

3) месячные значения индекса NAO – на сайте <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table>;

4) среднемесячные числа Вольфа – на сайте <https://www.sidc.be/silso/datafiles#total>.

2.2. Общая гидрологическая характеристика водоема

Общая гидрологическая характеристика включает сведения об образовании водоема, морфометрических показателях, отметок уровня и его колебаний, водообмена и водном балансе.

Морфометрические показатели. Основными морфометрическими показателями водоема являются: длина (L) – кратчайшее расстояние между двумя наиболее удаленными точками, измеренное по его поверхности; средняя ширина B – частное от деления площади зеркала (f_0) на длину (L); максимальная ширина (B_{\max}) – наибольшее расстояние между берегами по перпендикуляру к длине.

Длина береговой линии (L) измеряется по урезу воды. Показатель развития береговой линии равен отношению длины береговой линии (L) к длине окружности круга, имеющего площадь, равную площади зеркала водоема, $-K = \frac{L}{2\sqrt{f_0\pi}}$. Вычисляются площадь поверхности (f_0) и площади,

ограниченные отдельными изобатами. Определяются максимальная глубина (H_{\max}) и средняя (H_{cp}), равная частному от деления объема водоема (V) на площадь его зеркала (f_0). Объем водоема вычисляется графически либо аналитически. Дополнительно, в зависимости от поставленных задач

определяются: удлиненность озера – $K_y = \frac{L}{B}$ (форма близкая к округлой) – $K_y = 1.5-3$, овальной – $K_y = 3-5$, овально-удлиненная $K_y = 5-7$, удлиненная – $K_y = 7-10$, вытянутая в виде борозды – $K_y > 10$, площадь водосбора, F ; островность, $I = \frac{f'-f_0}{f} 100 \%$, f – общая площадь

озера: форма котловины, $C = \frac{\bar{H}}{H_{\max}}$ (для цилиндра, полуэллипсоида, парабо-лоида и конуса C соответственно равен 1, 2/3, 1/2 и 1/3); относительная

глубина, $a = \frac{\bar{H}}{f_0^{1/3}}$, при $a = 0.1-0.5$ – очень мелкие озера, $a = 0.5-2.0$ – мелкие, $a = 2-4$ – нормальные, $a = 4-10$ – глубокие, $a = 10-20$ – очень глубокие; средний уклон дна, α , $tg\alpha = \frac{l_1}{fh\Sigma_0}$, Σl_1 – сумма длин изобат, h – сече-

ние изобат; открытость озера, $K_{om} = \frac{f_0}{\bar{H}}$; батиграфическая кривая (Богословский, 1977; Эдельштейн, 2014).

Уровни воды. Изменение и колебание уровней водоемов могут происходить при изменении их объема или при нарушении горизонтального положения их поверхности (денивеляции). Средний уровень при наличии нескольких водомерных постов определяется как средний взвешенный с учетом площади зеркала, тяготеющей к постам.

Для водохранилищ характерны следующие уровни.

1. Нормальный подпорный уровень (НПУ) – наивысший уровень, длительно поддерживаемый подпорным сооружением.

2. Форсированный проектный уровень (ФПУ) – уровень, превышающий НПУ, поддерживаемый временно (например, в период половодья).

3. Уровень наибольшей проектной сработки (УПС).

4. Уровень мертвого объема (УМО) – наибольшей технической допустимой сработки.

Водный баланс. Приход и расход воды водоема может быть представлен в виде уравнения водного баланса, которое составляется для определенного периода и включает все виды поступления и расходования воды за этот период: $(W+P) - (E+Y) = \pm\Delta V$, где W – приток воды с водосбора, P – атмосферные осадки, E – испарение с водоема, Y – сток воды из водоема (Эдельштейн, 2014). При расчете водного баланса по месяцам или сезонам необходимо учитывать потери за счет оседания льда на берегах во время понижения уровня и прихода воды от таяния льда. В годовом балансе эти составляющие компенсируются.

Внутренний водообмен. Для расчета водообмена используется ряд формул: $K_6 = \frac{W_{cp}}{V}$, а его период: $\tau = 1/K_w$, где V – объем водохранилища за расчетный период (год), W_{cp} – среднегодовой объем притока; модель В.А. Знаменского – $K_6 = \frac{\Delta V}{\bar{V}}$, где $\Delta V = V_{кон} - V_{нач}$, $V_{кон}$ – объем на конец месяца, $V_{нач}$ – объем на начало месяца, \bar{V} – средний объем воды за тот же интервал времени. Наиболее унифицированная формула водообмена имеет вид:

$K_6 = (Q_n + Q_c)/(V_0 + V_\tau)$ – отношение средней величины расхода в транзитном потоке воды, движущейся по водохранилищу, к среднему объему воды в нем в течение расчетного периода (τ – год или его часть). Здесь Q_n – расход воды с водосбора, Q_c – расход воды, сбрасываемый в нижний бьеф, V_0 и V_τ – соответственно объем воды в начале и конце расчетного периода (Эдельштейн, 1998).

К важным показателям интенсивности внутреннего водообмена относится коэффициент проточности, который характеризует среднюю скорость перемещения вдоль продольной оси водоема границы несмешивающихся между собой новой и старой водных масс:

$$K_{np} = K_6 L / 365,$$

где L выражается в км, 365 – число суток в году (Эдельштейн, 2015). Другим значимым в экологическом отношении критерием водообменных процессов служит коэффициент водообновления ($K_{вод}$), который определяет долю «новой» воды, поступившей в водоем и оставшейся в нем до конца расчетного периода, по отношению ко всей воде в водоеме:

$$K_{вод} = 1 - \left(\frac{V_0}{V_k} \right)^{1 + \frac{W_{ом} / V_k}{1 - V_0 / V_k}},$$

где V_0, V_k – объем водоема в начале и конце расчетного периода, m^3 , $W_{от}$ – сток из водоема за то же время (Тимченко, 2006).

Интегральные кривые стока. Для выявления многолетних особенностей притока в водохранилища используются разностные интегральные кривые, построенные на основе выражений $\sum_1^i (W_i - W_{cp})$, или $\sum_1^i (K - 1)/C_v$, где $K = \frac{W_i}{W_{cp}}$ – модульный коэффициент, а W_i и W_{cp} соответственно текущий приток и средний по ряду наблюдений, C_v – коэффициент вариации. Применение данного выражения позволяет сравнивать интегральные кривые в относительных единицах для любых величин притока в водоемы.

Следующий этап анализа процессов стока заключается в выделении фаз водности в многолетних колебаниях притока. В гидрологии сформулированы следующие критерии оценки водности года по речному стоку: многоводные – до 25 % вероятности превышения, оцениваемой по многолетнему ряду стока, средние по водности годы – от 25 до 75 %, маловодные – от 75 % и больше (Кашутина и др., 2020). Каждой выделенной градации определены диапазоны изменения модульного коэффициента в зависимости от значений коэффициента вариации (Кузин, 1970). Анализ временных рядов притока показал, что C_v для верхневолжских водохранилищ составляет 0.26, а для водохранилищ Средней и Нижней Волги – 0.15. В этом случае для Верхней Волги к многоводным относятся годы с K равным 1.7–1.16, к средним по водности – 1.15–1.83 и маловодным – 0.83–0.53. Для Средней и Нижней Волги соответствующие значения K будут составлять 1.39–1.10, 1.09–0.9 и 0.89–0.67. При использовании указанных выше критериев на долю лет средней водности приходится 50 % всех рассматриваемых случаев.

Применительно к водохранилищам такой подход вызывает сомнения, поскольку объем притока в водоемы помимо климатических факторов зависит и от режима эксплуатации ГЭС. С другой стороны, Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) предложено к многоводным относить годы с модульными коэффициентами $K > 1.05$, к маловодным – годы с $K < 0.95$ и к средним по водности – с $1.05 \geq K \geq 0.95$ (Научно-прикладной справочник, 2021). Эти более жесткие критерии сужают диапазон средних по водности лет и соответственно увеличивают количество многоводных и маловодных лет, что более адекватно отражает водный режим водохранилищ (Поддубный и др., 2023).

Характеристика термической структуры водоема. Данные измерений температуры воды на отдельных горизонтах по станциям, в том числе и на АБС, и непрерывные регистрации температуры по ходу судна

позволяют получить сведения о термической структуре водоема в локальном, сезонном и годовом аспекте.

Следует отметить, что температура воды – наиболее динамичная характеристика, поле которой быстро перестраивается под действием течений. В результате в озеровидных плесах водохранилищ и озерах формируется серия холодных и теплых аномалий температуры воды. Под аномалиями температуры воды следует понимать области с положительными и отрицательными отклонениями температуры от ее средних значений в период проведения конкретной гидрологической съемки. Для выделения границ аномалий может быть применен метод математической статистики, суть которого заключается в следующем.

Вся совокупность значений температуры воды для каждой съемки рассматривается как некоторое частотное распределение. В пределах этого распределения выбирается реперное значение, левее которого располагаются меньшие, а правее – большие величины данного параметра. На примере двух разнотипных водоемов исследования показали, что в Рыбинском водохранилище и оз. Плещеево характер распределения значений температуры достаточно точно аппроксимируется нормальным распределением, реже встречается логнормальное распределение. В качестве реперного значения температуры воды было выбрано среднее ее вариационного ряда: $\bar{T}^{\circ}(C)$ – для нормального распределения и $\ln[\bar{T}^{\circ}(C)]$ – для логнормального. Формулы расчета экстремумов температуры воды имеют вид:

$$\begin{aligned} T^{\circ}(C)_{max} &= \bar{T}^{\circ}(C) + z_{\alpha}\sigma, \\ T^{\circ}(C)_{max} &= \bar{T}^{\circ}(C) - z_{\alpha}\sigma, \\ T^{\circ}(C)_{max} &= \exp[\ln\bar{T}^{\circ}(C) + z_{\alpha}\sigma], \\ T^{\circ}(C)_{max} &= \exp[\ln\bar{T}^{\circ}(C) - z_{\alpha}\sigma], \end{aligned}$$

где z_{α} – стандартная нормальная переменная при заданном уровне вероятности α . Применение z_{α} в качестве множителя σ в формулах позволяет классифицировать значения температуры не только по признаку отклонения от среднего, но и задать значение вероятности встречи этих величин в пределах водоема. В качестве значений z_{α} нами были выбраны следующие: 0.8416 и 1.2816 при соответствующих уровнях вероятности 0.8 и 0.9 ($\alpha = 0.2$ и $\alpha = 0.1$) (Закс, 1976). Значение z_{α} для каждого рассматриваемого водоема выбиралось таким образом, чтобы горизонтальные размеры аномалий соответствовали мезо- (до 10 км) и крупномасштабным (10–100 км) динамическим явлениям в озерах и водохранилищах (Филатов, 1983). В связи с этим, для Рыбинского водохранилища, исходя из его размеров, принималось значение z_{α} равное 0.8416, а для оз. Плещеево – 1.2816, способствующее уменьшению области аномалий.

Для этих водоемов была выявлена суточная динамика аномалий, заключающаяся в их перемещении и вращении относительно центра масс под действием течений. Динамика температурных аномалий изучалась на полигоне, расположенном в юго-восточной части Рыбинского водохранилища в мае 1990 г. и в южной части оз. Плещеево в августе 1983 г. Показано, что характер перемещения и вращения аномалии указывал на наличие в пределах полигонов циклонического круговорота, существование которого подтвердилось в последствии при моделировании интегральной циркуляции воды в водохранилище с учетом соответствующих съемкам гидрометеорологических условий (рис. 2.1) (описание модели течений будет дано в гл. 4).

Непрерывные регистрации температуры и электропроводности воды по ходу судна позволяют получить банк данных этих характеристик по выбранным разрезам в пределах исследуемых водоемов. С помощью рассмотренный выше (гл. 1) аппаратуры («Марк 603» и ноутбук, снабженный приемником GPS) и специальной программы, согласующей сигнал с анализатора и спутникового приемника и записывающей информацию в текстовый файл формата csv, формируется файл, содержащий 8 колонок: порядковый номер, дату и время, географические координаты в десятичном формате, температуру в градусах Цельсия и три колонки содержащие электропроводность воды – измеренную, приведенную к 18°C и приведенную к 25°C (рис. 2.2). Полученные данные анализируются в ГИС Quantum GIS (QGIS, <https://qgis.org/>).

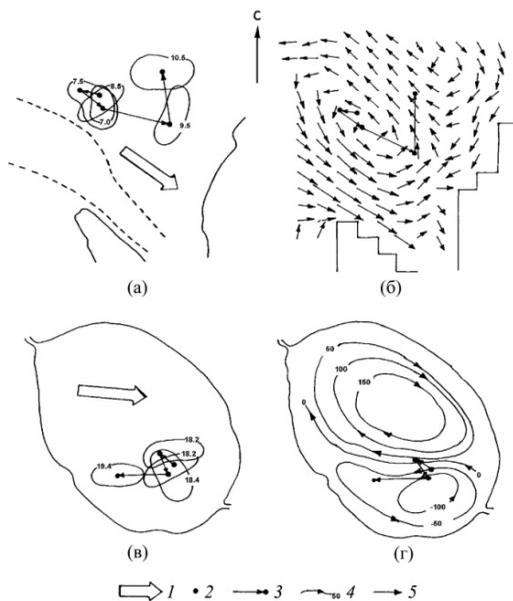


Рис. 2.1. Динамика аномалий температуры воды в Рыбинском водохранилище: а – 7–22 мая 1990 г., б – на фоне модельной циркуляции воды в оз. Плещеево; в – 4–7 августа 1983 г.; г – на фоне модельной циркуляции воды. 1 – направление ветра, 2 – центры аномалий, 3 – траектория перемещения аномалий, 4 – изолинии функции полных потоков ($\text{м}^3/\text{с}$), 5 – вектора интегрального переноса воды направленные на максимальный вектор.

Для этого в ГИС проект добавляется файл в виде текстового файла с разделителями, задаются разделители, географическая привязка и проекция. Далее загружается подложка с водными объектами, полученная на основе открытого проекта Open Street Map (OSM, <https://www.openstreetmap.org/>).

№	Дата и время	latitude	longitude	Темп., °С	X, (мкСм/см)	X18, (мкСм/см)	X25, (мкСм/см)
1	05.06.2016 18:24	56.336132	44.074845	19.3	274.7	266.7	316.1
2	05.06.2016 18:25	56.335335	44.076978	19.5	357.3	345.4	409
3	05.06.2016 18:26	56.334422	44.079227	19.7	392.7	377.9	447.2
4	05.06.2016 18:27	56.333475	44.081082	19.7	390.2	375.5	444.4
5	05.06.2016 18:28	56.332672	44.081513	19.6	398.6	384.5	455.1
6	05.06.2016 18:29	56.33237	44.080842	19.6	401.4	387.2	458.3
7	05.06.2016 18:30	56.332567	44.080007	19.6	405.3	390.9	462.8
8	05.06.2016 18:31	56.332895	44.078982	19.6	405.9	391.5	463.5
9	05.06.2016 18:32	56.33309	44.078138	19.6	399.3	385.1	455.9
10	05.06.2016 18:33	56.333162	44.077802	19.6	399.1	384.9	455.7

Рис. 2.2. Пример лог файла, сформированного системой сбора информации.

Одной из важнейших характеристик гидрологического режима водоема является его вертикальная термическая структура. В качестве основных параметров, характеризующих вертикальную термическую структуру водоема могут быть: средняя температура эпи- и гипolimниона, максимальные градиенты температуры в сезонном термоклине и суточных термоклинах, глубины их залегания, глубины эпи- и гипolimниона, толщина термоклинов и гипolimниона. Глубины эпилимниона, промежуточных квазиоднородных слоев, границы суточных термоклинов и глубина гипolimниона определяются по методу, согласно которому критерием выделения границ раздела служит разность между температурой воды на некотором вышележащем и на рассматриваемом горизонте. Квазиоднородным считается слой, где эта разность не превышает 1° (Калацкий, 1978).

Для более глубокого анализа пространственно-временной изменчивости рассмотренных гидрологических процессов могут быть использованы статистические методы: корреляционный, регрессионный, спектральный и кластерный анализы.

Теплосодержание водоема. Рассмотренные выше регистрации температуры воды по вертикали на станциях, а также непрерывные съемки температуры по ходу судна дают представление о локальной единовременной структуре водных масс водоема. Вместе с тем одной из важнейших характеристик термического режима водоемов является теплосодержание их водной массы, имеющее важное экологическое значение. Обладая большей теплоемкостью, водная масса способна накапливать

значительное количество тепла, уменьшая, таким образом, колебания температуры воды и стабилизируя гидробиологические процессы. В течение сезона колебания теплосодержания определяются изменениями объема водоема (в большей степени это касается водохранилищ) и температуры воды. Изменение теплозапаса (теплосодержания) водной массы вычисляется по формуле:

$$\pm \Delta \theta = c_p \rho (W_{\text{кон}} \bar{T}_{\text{кон}} - W_{\text{нач}} \bar{T}_{\text{нач}}),$$

где c_p – теплоемкость воды, 4190 Дж/(кг°С); ρ – плотность воды, 1000 кг/м³; $\bar{T}_{\text{кон}}$, $\bar{T}_{\text{нач}}$ – средняя температура воды в конце и начале расчетного периода соответственно. Расчет теплозапаса может проводиться как для всего водоема в целом, так и для отдельных его частей, в том числе и для мелководий (Эдельштейн, 2014; Поддубный, 2019).

2.3. Водные массы

При анализе гидрологических материалов очень часто обращает на себя внимание наличие в водоемах вод с различными физико-химическими свойствами или, иначе, различных водных масс. Необходимо четко различать понятие «водная масса» как некая индивидуальность со свойственными только ей физико-химическими и биологическими характеристиками и понятие «масса воды», когда речь идет о любой воде, наполняющей водоем. Согласно определению Н.В. Буторина, понятие «водной массы» для континентальных водоемов может быть сформулировано следующим образом: «Водной массой пресных водоемов можно назвать некоторый сравнительно большой объем воды, формирующийся в определенных географических условиях бассейна или в самом водоеме, обладающий в течение каждой фазы гидрологического режима почти постоянными величинами и относительно равномерным распределением физических, химических и биологических характеристик, составляющих единый комплекс, и распространяющийся как одно единое целое» (Буторин, 1969, с. 175).

При выделении водных масс за основу берутся физические и химические характеристики вод (температура, электропроводность, цвет, прозрачность, мутность, щелочность, жесткость, содержание гидрокарбонатов, ионов кальция, магния, содержание растворенного кислорода). До сих пор не установлен единый показатель или несколько вполне определенных показателей, которые были бы общими для всех водоемов и позволили бы непосредственно характеризовать их водные массы. Для выделения водных масс волжских водохранилищ была разработана методика, в основу которой положены косвенные методы выделения водных масс в морях и океанах (Буторин, 1969). Различные по своим

свойствам водные массы в водоеме в первом приближении могут быть обнаружены уже при анализе кривых распределения отдельных характеристик. В этом случае выделение водных масс наиболее целесообразно по точкам перегиба кривой распределения (T , S -анализ). Это позволяет наметить границы водных масс по каждой используемой характеристике в вертикальном плане на отдельных станциях. Последующий анализ положения станций, измеренные свойства вод которых попадают в тот или иной выбранный интервал кривой распределения, позволяет определить и репрезентативность отдельных характеристик.

Зная координаты характеристик смешивающихся водных масс и координаты T , S -смеси не трудно определить процентное содержание каждой в исходной водной массе. В случае наличия трех однородных водных масс основные характеристики смеси определяются формулами:

$$\bar{T} = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + m_3 T_3}{m_1 + m_2 + m_3}, \quad \bar{S} = \frac{m_1 S_1 + m_2 S_2 + m_3 S_3}{m_1 + m_2 + m_3}.$$

Результат полного смешения трех водных масс будет изображаться T , S -точкой, лежащей внутри треугольника смешения. В случае двух водных масс третье слагаемое в выше приведенных формулах отсутствует, а T , S -точка будет лежать на прямой линии (Буторин, 1969; Мамаев, 1970). В качестве примера рассмотрим возможности выделения водных масс в устьевых областях системы малых рек, находящихся в зоне подпора водохранилища (р. Ильдь и р. Сутка, Волжский плес Рыбинского водохранилища) (рис. 2.3).

Построение T , S -кривых. При анализе вертикального распределения температуры и электропроводности воды обращают внимание на их однородность или стратификацию. В случае не меняющихся по вертикали этих значений на гидрологической станции присутствует одна водная масса (рис. 2.4.). Вертикальная неоднородность указанных характеристик свидетельствует о наличии двух или более водных масс.

Незначительные изменения электропроводности воды по вертикали и наличие температурной стратификации указывают на наличие однородной по генезису водной массы, но с разной степенью прогрева (рис. 2.5а, б). Существенные измерения температуры и электропроводности по вертикали могут характеризовать наличие двух водных масс: например, придонной более холодной речной и поверхностной прогретой озерной водной массы или ее трансформированной части (рис. 2.5в).

Построение треугольников смешения. Результат полного смешения трех водных масс будет изображаться T , S -точкой, лежащей внутри треугольника смешения или на одной из его сторон (Буторин, 1969). Треугольник смешения представляет собой номограмму, по которой

определяется процентное содержание каждой водной массы на выбранной гидрологической станции (рис. 2.6–2.8). В случае наличия только двух водных масс их T , S -точки будут лежать на прямой смешения (рис. 2.9). Использование формул смешения с заданным процентным соотношением составляющих водных масс позволяет рассчитать температуру и электропроводность воды и по их значениям провести границу (на продольном разрезе или в плане) преобладающих на конкретном участке акватории водоема водных масс. Кроме того, для выделения границ водных масс в горизонтальном плане может быть использован метод наиболее репрезентативного показателя, т.е. граница между водными массами устанавливается в соответствии с производной градиента выбранного показателя по расстоянию (Буторин, 1969).

При выделении водных масс большую ценность представляет возможность одновременного учета целого комплекса показателей гидрофизического и гидрохимического состояния среды. Для решения такой задачи можно использовать метод разложения на естественные ортогональные составляющие. Этот метод дает возможность с помощью математических преобразований от большого числа физических, химических и биологических характеристик перейти к небольшому числу статистических комплексных независимых функций, полученных с учетом взаимосвязи как между исходными признаками, так и с морфометрией водоема. Математические основы метода приводятся в работе Н.П. Смирнова и О.Ф. Кондрацовой (1972).

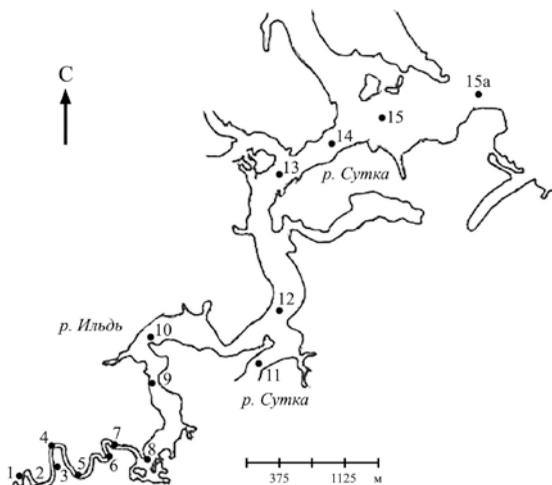


Рис. 2.3. Сема устьевых областей р. Ильдъ и р. Сутки с расположением гидрологических станций.

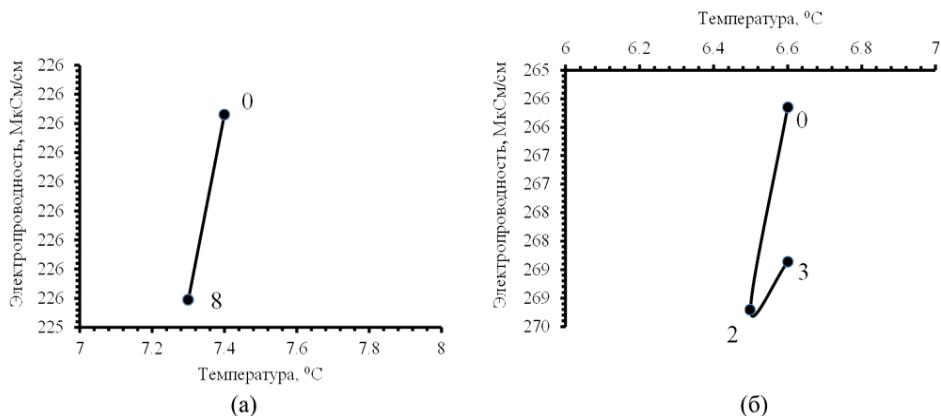


Рис. 2.4. T, S -кривые, съемка 23.04.2007 г.: а – ст. 15, б – ст. 6. Цифры – горизонт измерений, м.

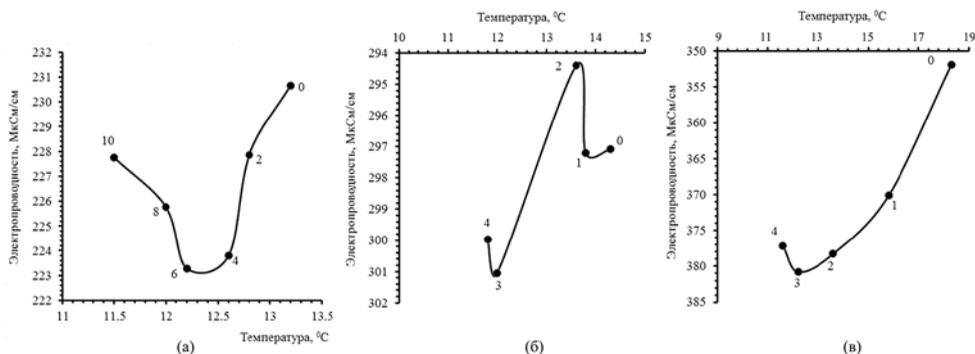


Рис. 2.5. T, S -кривые, съемка 17.05.2007 г.: а – ст. 15, б – ст. 10, в – ст. 6. Цифры – горизонт измерений, м.

2.4. Характеристика процессов седиментации в водохранилищах

2.4.1. Районирование по условиям осадкообразования, расчет площадей, объемов и темпов седиментации на примере волжских водохранилищ

Разнообразные условия осадкообразования в водохранилищах требуют детального районирования для более полной характеристики формирования донных отложений. В связи с этим, кроме плесов и районов, водохранилища разбивались на участки (от 1 на Саратовском, до 20 на Рыбинском) сравнительно однородные по морфометрическим и гидрологическим условиям. Каждый участок характеризовал зоны переменного подпора (верхние и нижние бьефы гидроузлов), расширения и сужения акваторий

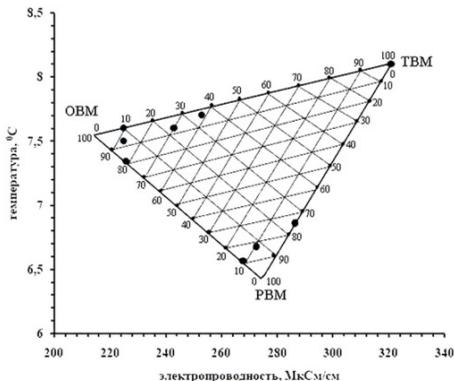


Рис. 2.6. Треугольник смешения водных масс, съемка 23.04.2007 г. РВМ – речная водная масса, ОВМ – озерная водная масса, ТВМ – трансформированная водная масса. Цифрами обозначены проценты содержания водных масс.

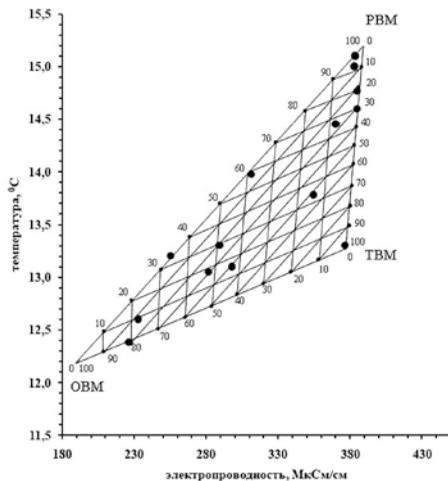


Рис. 2.7. Треугольник смешения водных масс, съемка 17.05.2007 г. РВМ – речная водная масса, ОВМ – озерная водная масса, ТВМ – трансформированная водная масса. Цифрами обозначены проценты содержания водных масс.

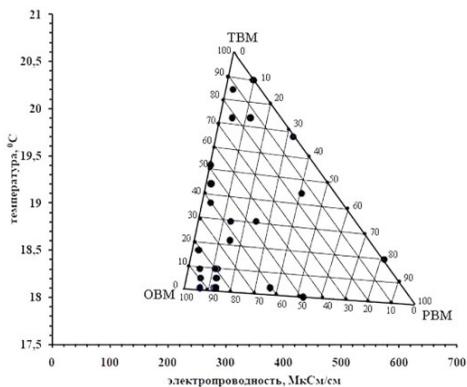


Рис. 2.8. Треугольник смешения водных масс, съемка 14.06.2007 г. РВМ – речная водная масса, ОВМ – озерная водная масса, ТВМ – трансформированная водная масса. Цифрами обозначены проценты содержания водных масс.

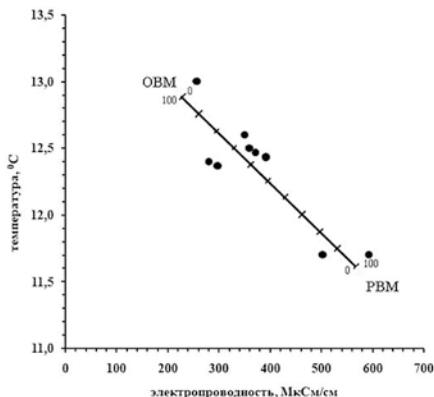


Рис. 2.9. Прямая смешения водных масс, съемка 21.09.2007 г. РВМ – речная водная масса, ОВМ – озерная водная масса. Цифрами обозначены проценты содержания водных масс.

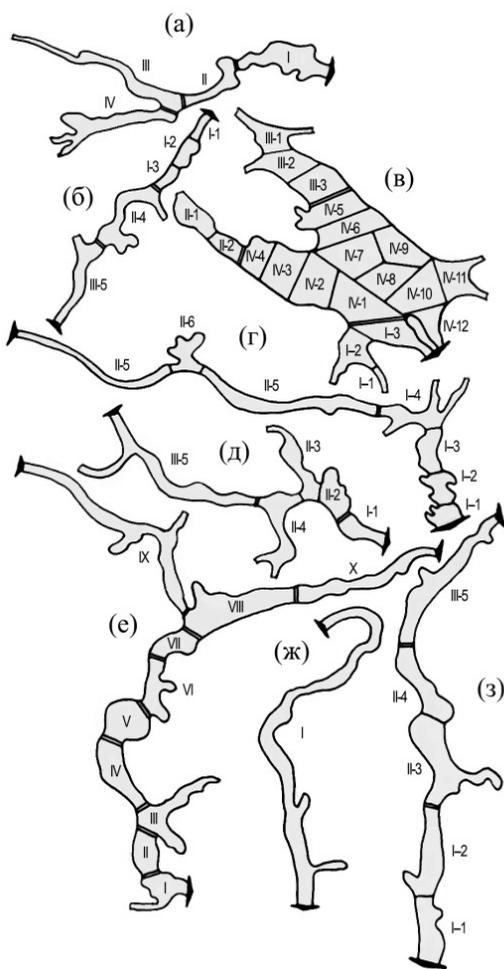


Рис. 2.10. Районирование водохранилищ Волги по условиям седиментации: а – Ивановское, б – Угличское, в – Рыбинское, г – Горьковское, д – Чебоксарское, е – Куйбышевское, ж – Саратовское, з – Волгоградское. Римские цифры – плесы, районы, арабские – участки.

яющему типу, по изобатному принципу, когда обнаруженные категории осадков занимали отдельную нишу с известной площадью (например, от 0 до 1 м, от 1 до 1.5 м, от 1.5 м до 3.0 м и т.д.) и методом вероятностного распределения, зависящего от количества станций определенного типа

(крупные заливы и устья рек), где осаждение взвешенных частиц и формирование донных осадков отличаются особенностями проявления гидродинамических процессов (рис. 2.10).

Площади и объемы водохранилищ (при НПУ), плесов, районов и участков (по интервалам глубин) выбирались из проектных документаций (Гидрометеорологический режим..., 1975, 1978), или рассчитывались (Рыбинское и Чебоксарское водохранилища) стандартными геодезическими методами с использованием крупномасштабных карт (Бакулин, 1968; Литвинов, Законнова, 1986, 1994). Для каждого участка определялась средняя толщина слоя отложений в заданном интервале глубин, которые устанавливались в зависимости от площади водоема, среднегодовое колебаний уровня воды и воздействия ветрового волнения на дно.

Количество измерений для вычисления средней толщины слоя донных отложений в данном интервале глубин (в зависимости от разнообразия типов грунта) колебалось от 10 до 50, а на полигонах до 250 станций. Площади ДО определялись тремя способами: по преобладающему типу, по изобатному принципу, когда обнаруженные категории осадков занимали отдельную нишу с известной площадью (например, от 0 до 1 м, от 1 до 1.5 м, от 1.5 м до 3.0 м и т.д.) и методом вероятностного распределения, зависящего от количества станций определенного типа

грунта. Окончательная площадь распределения типов донных осадков принималась на основании экспертной оценки с учетом всех вышеперечисленных способов. Объем материала, отложившегося в каждом интервале глубин, определялся по сумме толщины слоя конкретного типа грунта деленной на количество станций, умноженной на площадь. Количество разнокачественного материала, накопившегося на дне, суммировалось для всего плеса (района), а затем и всего водохранилища. Вес конкретного типа отложений вычислялся как произведение его объема на среднюю воздушно-сухую объемную массу, определенную в кернах на трех горизонтах (поверхностный слой 0–10 см, середина керна и слой в 10 см выше маркирующей подстилки). Общая масса ДО равнялась сумме всех весов по интервалам глубин, участкам и плесам (районам).

Такая методика позволяет рассчитать показатели темпов седиментации (среднегодовые за время существования водохранилища или между съемками) для всех типов ДО, по интервалам глубин, для отдельного участка и в целом по водохранилищу. Кроме того, данный подход позволил оценить седиментационные процессы по различным типам осадкообразования: *занесению* (аккумуляцию всех типов наносов в расчете на площадь водохранилища при НПУ; *осадконакоплению* (аккумуляцию всех типов наносов (крупнозернистых и тонкодисперсных) на площадь их распространения, без площадей размыва и гидроморфного почвообразования); *илонакоплению* (аккумуляцию частиц алевритовой и пелитовой фракций на площадь их распределения) (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Среднегодовая интенсивность осадкообразования в водохранилищах Волги в начале XXI века

Водохранилище	Осадконакопление		Занесение		Илонакопление	
	мм	кг/м ²	мм	кг/м ²	мм	кг/м ²
Иваньковское	1.9	1.7	1.7	1.4	3.0	1.5
Угличское	2.1	1.6	1.8	1.4	4.0	1.3
Рыбинское	2.7	2.3	2.4	2.0	5.9	3.0
Горьковское	2.7	2.0	2.2	1.7	4.6	2.4
Чебоксарское	1.8	2.0	1.5	1.6	3.0	1.9
Куйбышевское	4.4	2.8	3.8	2.4	7.1	3.9
Саратовское	3.8	4.3	2.8	3.2	9.0	6.4
Волгоградское	4.9	4.4	4.3	3.9	8.0	5.3
R ²	0.69	0.78	0.59	0.77	0.62	0.73

2.4.2. Картирование донных отложений с использованием ГИС на примере Куйбышевского водохранилища

Важнейшим элементом наглядности трансформации структуры и свойств донных отложений является их картирование в пространственно-временном аспекте с использованием ГИС-технологий.

Методика анализа грунтового комплекса водохранилищ посредством ГИС включает следующие этапы:

- импорт данных мониторинговых гидрологических съемок в среду программного пакета ГИС;
- формирование структуры и накопление картографических и атрибутивных баз данных создаваемой программы;
- разработка алгоритма построения векторных карт донных отложений водохранилищ с учетом их гидрологических и морфометрических характеристик;
- выявление основных закономерностей пространственно-временной трансформации грунтового комплекса, исходя из возможностей ГИС;
- расчет этапов и скоростей накопления различных типов донных осадков;
- выявление (установление) пространственных и временных трендов изменения геохимических свойств подводных грунтов (Хасанов, Законов, Иванов, 2012).

Разработанный алгоритм реализован в программном пакете MapInfo. На этапе импорта данных грунтовых съемок Куйбышевского водохранилища в среду программного пакета MapInfo вводились все имеющиеся материалы с разрешением 300 точек на дюйм и сохранялись в формате TIFF без потерь качества изображения. Координатная привязка отсканированных изображений грунтовых станций осуществлялась на топографической основе (м 1:100000, 1:25000). Итоговые карты грунтовых съемок содержали только физические поля, обозначающие определенный тип донных отложений. Для точной привязки было определено от 10 до 20 реперных точек для каждой карты, чтобы средняя ошибка разброса станций (150–1140) не превышала допустимых значений ($\leq 10\%$) (Законнов и др., 2007). Картографирование проводилось для Волжско-Камского участка водохранилища, отличающегося наиболее сложной топографической структурой. В результате векторизации растровых изображений района исследования получено три тематических ГИС-слоя, каждый из которых содержит данные мониторинга донных осадков. Съемка 1961 г. характеризуется большой генерализацией (рис. 2.11а). Карта на ее основе выглядит упрощенной. Карты, построенные на основе грунтовых съемок 1983, 1993 и 2001–2002 гг. (рис. 2.11б, в, г), отличаются высокой детализацией и, как следствие, большим количеством типовых разновидностей донных отложений. Анализ четвертого слоя показал незначительные изменения структуры ложа после 2002 г. В 2015–2022 гг. данные на 45 контрольных станциях со спутниковой привязкой, подтвердили стабильность распределения основных типов дон-

ных отложений и их накопление в орографических районах. Согласно результатам последних исследований пространственно-временная изменчивость грунтового комплекса и его стабилизация подтверждается и в целом по водохранилищу (табл. 2.2). Увеличение количества станций усложняет мозаику распределения донных осадков и не вносит существенных изменений в их пространственно-временную трансформацию, выявленную в первые годы функционирования водохранилища. Следовательно, карта донных отложений Куйбышевского водохранилища, составленная в единой геoinформационной системе для 2002 г., может быть актуальна вплоть до 2035 г.

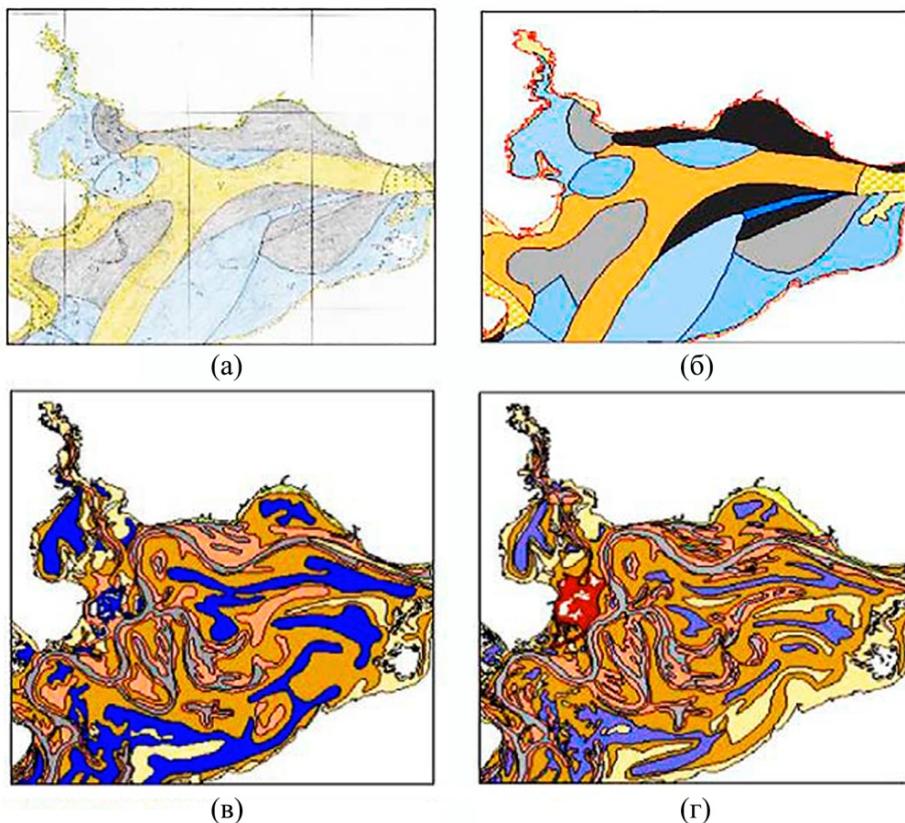


Рис. 2.11. Результаты анализа грунтового комплекса Волжско-Камского расширения в среде MapInfo, растровое изображение, векторизованные карты по материалам съемок: а – 1961 г., б – 1983 г., в – 1993 г., г – 2001, 2002–2022 гг.

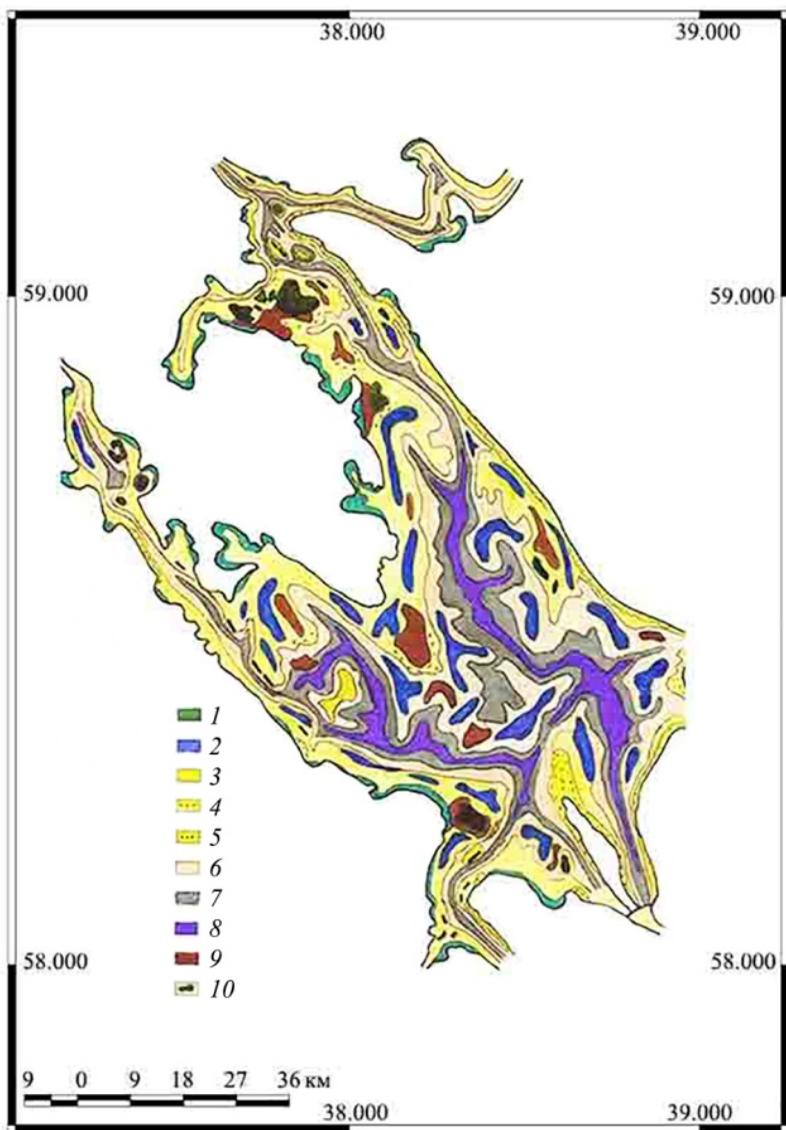


Рис. 2.12. Структура дна Рыбинского водохранилища (съемка 2020–2022 гг.). Трансформированные грунты: 1 – болотные и заболачивающиеся почвы; 2 – размывшие почвы и породы. Крупнозернистые наносы: 3 – пески; 4 – песок с торфяной крошкой; 5 – песок с галькой; 6 – илистый песок. Тонкодисперсные отложения: 7 – песчанистый и глинистый (серый) ил; 8 – торфогенный ил; 9 – торф затопленный, торфяно-макрофитные сплавины и отложения; 10 – острова.

Таблица 2.2. Изменения площадей грунтового комплекса Куйбышевского водохранилища, %

Тип грунта, донных отложений	1955	1961	1983	1993	2002	2017	2035 (прогноз)
Трансформированные грунты (почвы)	(97)	55	17	15	12	14	12
Крупнозернистые наносы	2	30	40	42	43	44	45
Тонкодисперсные отложения	1	15	43	43	45	42	43

Результаты достигнутой визуализации стали возможными благодаря созданию цифровой карты верхнего (10 см) слоя пространственного распределения донных осадков по целому ряду физико-химических характеристик, активно взаимодействующих в системе вода–дно. Все современные карты донных осадков Волжского каскада выполнены по этому принципу (рис. 2.12).

Глава 3. Дистанционные методы изучения водных экосистем

3.1. Методы дистанционного зондирования водных объектов

Дистанционное зондирование представляет собой процесс, позволяющий собирать информацию о водном объекте, прилегающей территории (водосборе) или явлении без непосредственного контакта с ним. К дистанционному зондированию можно отнести все виды неконтактных съемок, которые проводятся с различных измерительных платформ: летательных воздушных и космических аппаратов, судов и подводных лодок, наземных станций (Сутырина, 2013). В настоящее время прослеживается тенденция свертывания программ проведения аэрофотосъемок земной поверхности. Перспективными направлениями изучения функционирования отдельных звеньев водных экосистем становятся спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие осуществлять полномасштабный и оперативный мониторинг состояния крупных водоемов, а также распределение отдельных видов гидробионтов по всей их акватории (Буканова, 2011). Следует отметить, что для изучения ограниченных участков акваторий водоемов и малых водных объектов успешно используются беспилотные летательные аппараты (малые БПЛА), оснащенные фото- и видеоаппаратурой (Цветков и др., 2020).

Основные средства дистанционного слежения за экосистемой внутреннего водоема разнообразны и включают аэрокосмические, многоспектральные, телевизионные, фотографические и сканерные радиометрические системы видимого и ИК диапазонов, СВЧ-радиометрию (пассивную и многоканальную), лидарную технику, радиолокационное зондирование.

Одной из современных тенденций развития систем мониторинга водных объектов является применение дистанционных оптических методов и средств (дистанционного лазерного зондирования), обеспечивающих квазисинхронный режим съемки параметров водной среды на протяженных акваториях. В настоящее время к одной из разновидностей дистанционного зондирования следует отнести интенсивно развивающуюся технику контактного дистанционного зондирования, использующую оптоволоконные приемно-передающие кабели. Применение такой техники дает возможность получить сведения о структуре водных масс. В качестве индикатора может выступать флуоресценция гумусового вещества, являющегося неотъемлемым компонентом природных вод (Литвинов и др., 2008).

Получение первых изображений поверхности Земли из космоса, в том числе и океана, открыло перспективные возможности использования

искусственных спутников земли (ИСЗ) для исследования разнообразных океанических процессов. Запуски специализированных океанографических спутников серии «Океан-О» (Асташкин и др., 2018; Космический аппарат «Океан-О», 2014) показали принципиальную возможность измерять из космоса поверхностные волны и их спектры, приповерхностный ветер и штормовые нагоны, приливы и океанский геотид, температуру поверхности океана, содержание паров в приводном слое воздуха, океанские течения, вихри, ринги и меандры, локализацию апвеллингов, ледяной покров, движение айсбергов, выходы внутренних волн, явления в прибрежной зоне моря, глубины дна на мелководье, перенос донных отложений и эстуарийные явления, загрязнения океана промышленными отходами и нефтью, содержание хлорофилла, распространение планктона и водорослей по поверхности океана и т. п. (Монин, Красицкий, 1985).

Методы дистанционного зондирования широко развиты и в гидрологии. С помощью разных носителей, снабженных специализированными комплексами оборудования, могут быть получены данные для: дешифрирования болот, рек, озер; выявления речных и озерных водосборов; мониторинга половодий и паводков; осуществления мониторинга ледовой обстановки на реках и озерах; контроля качества озерных вод; оценки испарения с земной поверхности и количества осадков; расчета запаса воды в снеге, наблюдения за процессами снеготаяния в целях прогнозирования стока и т. д. (Калинин и др., 1977; Сутырина, 2013).

В настоящее время, в связи с нарастающей тенденцией изменения климатических условий возникает необходимость мониторинга гидрологического режима озер и водохранилищ. Анализ данных ДЗЗ позволяет выявить тенденции изменения площади крупных и малых озер и оценить возможности определения их уровня воды по косвенным данным (Морозов и др., 2022; Rylov, Pestunov, 2019). В частности, уменьшение стока Дона, Кубани и крымских рек в отдельные годы приводит к существенным изменениям площади ряда водохранилищ на юге Европейской части РФ (Шинкаренко и др., 2021). Другим важным аспектом изучения структуры ложа водохранилищ выступает мониторинг изменения берегов водоемов, подводной части берегового склона методами спутниковой батиметрии, обсыхающих отмелей и прибрежных экотонов водохранилищ (Бочаров, Тихомиров, 2015; Шинкаренко и др., 2021). В последнем случае может быть выявлена зона непосредственного проникновения вод водохранилища вглубь территории суши и определение площади мелководий и прилегающих водноболотных экосистем (Кутузов, 2018).

Опыт использования данных ДЗЗ при изучении океанических процессов нашел широкое применение и при исследовании термодинамических и биологических явлений на крупных озерах. В целом относительно дистанционных методов следует отметить, что они, как правило, являются косвенными, поскольку с их помощью измеряются не реальные параметры водной среды, а некоторые связанные с ними величины. Чтобы дешифровать такие параметры, требуются предварительные исследования, включающие в себя различные эксперименты по изучению интересующего объекта контактными методами (Сутырина, 2013). Такие целенаправленные многоуровневые эксперименты по изучению термогидродинамических полей начались с 1986 г. на Ладожском и Онежском озерах и продолжались несколько лет в рамках программы «Онего». Наблюдения выполнялись с помощью всех доступных средств (АБС, судов, самолетов, трех спутников) и не имели аналогов на других озерах. В частности было показано, что измерение температуры воды поверхностного слоя может эффективно осуществляться дистанционными средствами: ИК-радиометрами с самолетов, судов и спутников серии NOAA. Выполненные синхронные судовые, самолетные и спутниковые наблюдения позволили отработать вопросы дистанционных измерений температуры поверхности воды (ТПВ) с учетом особенностей гидрометеорологических условий и влияния атмосферы на авиакосмические измерения при помощи ИК-радиометра (Филатов, 1991).

Применительно к водохранилищам такой многоуровневый эксперимент однократно был проведен только на Рыбинском водохранилище во второй половине 1980-х гг.

3.2. Международный целевой комплексный проект «Интеркосмос» – «Внутренние водоемы»

Комплексные полевые исследования по программе «Интеркосмос» – «Внутренние водоемы» проводились в мае–июне 1987 г. на Рыбинском водохранилище, целью которых являлась разработка контактно-дистанционных методов контроля качества природных вод в системе «водоем–водосбор». Использовались данные многоспектральных дистанционных измерений в видимом, ИК, СВЧ-диапазонах, а также опорных контактных наблюдений на водоеме и водосборе. В комплексных исследованиях принимали участие специалисты различных профилей из четырех стран (Болгарии, Польши, Советского Союза, Чехословакии), что позволило расширить круг решаемых задач, в том числе провести по широкой программе эксперименты на водосборе водоема (Кондратьев и др., 1988).

Экспедиционные работы проводились на базе ИБВВ РАН с привлечением судов «Академик Топчиев», «Борок», «Ареал», «Гидролог». Район работ охватывал западную часть Главного плеса водохранилища, где был разбит полигон общей площадью 320 км² (14×23 км). Работы на полигоне выполнялись по 6 разрезам на 30 станциях. Точки постоянных наблюдений привязывались к навигационным буям или обставлялись вехами. В 1987 г. продолжительность съемок составляла 10–14 ч. Съемки выполнялись с двух судов с периодичностью в 2–4 сут (Экологические факторы..., 1993). С Российской стороны, помимо сотрудников ИБВВ РАН, участвовали специалисты из разных учреждений: Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Гидрохимического института, Института физики НАН Беларуси.

Помимо экспедиционного флота ИБВВ РАН в эксперименте участвовало судно «Лимнея» Института озераведения РАН. В качестве воздушных носителей использовались вертолет Ми-8, самолеты АН-2 и ИЛ-18. Самолет-лаборатория ИЛ-18 находился в распоряжении Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, оснащенный аппаратурой для изучения взаимодействия атмосферы, солнечного излучения и подстилающей поверхности. Самолет-лаборатория создан для проведения подспутниковых экспериментов при планированных запусках метеорологических спутников. По предложению академика К.Я. Кондратьева самолет был дополнительно оснащен спектрометрической аппаратурой (Бузников, 2020; К 75-летию профессора..., 2014).

Как уже отмечалось выше, одной из главных задач эксперимента было исследование природно-хозяйственных структур на водосборе рек (в качестве такого объекта была выбрана часть водосбора р. Сить – правого притока водохранилища). Кроме того, наблюдениями был охвачен район, непосредственно примыкающий к береговой части водохранилища, включая зону подтопления и мелководий. Изучение контактной зоны между экотонами мелководий и прибрежной части суши чрезвычайно важно для понимания процессов взаимодействия водных масс водохранилища и геокомплексов побережий, поскольку именно здесь происходит обмен веществом и энергией между акваторией и сушей, во многом определяющей качество вод и состояние ландшафтов береговой зоны. Наземные исследования на водосборе включали инструментальные и визуальные наблюдения структуры землепользования, типов рельефов, геоморфологических характеристик влажности почвы, уровня грунтовых вод, а также описание почвенно-растительного покрова.

Зондирование природно-хозяйственных структур водосбора проводилось с борта самолета АН-2 СВЧ радиометрической системой.

Дешифрирование СВЧ-регистраций ставило своей целью восстановить влажность почв, диагностировать характеристики весеннего поверхностного стока и состояния растительности. В результате дешифрирования были выделены следующие природно-хозяйственные структуры: лес сухой и лес переувлажненный с участками открытой воды; в структуре сельхозугодья – относительно сухая почва, переувлажненная почва, переувлажненная почва с участками открытой воды; селитебные территории – отдельные строения, скопления металлических объектов, грунтовые и асфальтовые дороги.

В целом анализ данных самолетных СВЧ-наблюдений и опорной информации показал перспективность дистанционных методов с точки зрения дешифрирования различных типов структур водосбора, а также для контроля качества природных вод в системе водоем–водосбор, для оценки состояния растительности зон подтопления и мелководий.

Вероятно, в силу объективных причин результаты комплексных дистанционных исследований не были представлены в виде отдельного обобщающего издания. Результаты же контактных измерений гидрологических и гидробиологических параметров на полигоне Рыбинского водохранилища нашли свое отражение в коллективной монографии «Экологические факторы пространственного распределения и перемещения гидробионтов», изданной в 1993 г. Следует отметить, что в целом успешное проведение многоуровневого эксперимента «Интеркосмос» – «Внутренние водоемы» позволило создать основу для дальнейших исследований в этом направлении. Усилиями специалистов разных профилей был подготовлен международный целевой комплексный проект «Изучение состояния и динамики экосистем внутренних водоемов с применением аэрокосмических методов».

Предполагалось, что в результате проведенных исследований будут разработаны научно-обоснованные критерии оперативных методов оценки качества вод и биопродуктивности внутренних водоемов, даны рекомендации по организации крупномасштабной многоуровневой системы мониторинга (оценка состояния и математическое прогнозирование), будут выполнены обоснования измерительных систем и даны предложения по усовершенствованию комплексов специализированной аэрокосмической и экспресно-контактной аппаратуры с целью создания основ решения задачи прогноза и управления развитием озер и водохранилищ, водосборных территорий. Программа была рассчитана на период работы с 1988 по 2000 гг. Объектами исследования могли стать крупные озера и водохранилища России, водоемы и их водосборы на территориях бывших соцстран. Предложенная программа дистанционных исследований внутренних водоемов так и осталась только в проекте вероятно по причине

большой стоимости, и начинающихся политических, экономических и социальных трудностей в преддверии и после распада СССР.

Следует отметить, что изучение взаимодействия комплекса гидрологических, гидробиологических и биологических характеристик суши в системе «водоем–водосбор» имеет важное значение при комплексном исследовании функционирования водных экосистем. В этом случае важным направлением исследований является выявление всесторонних связей в локальных экосистемах переходной зоны (экотонах) мелководий крупных равнинных водохранилищ.

3.3. Методы выделения ландшафтов переходной зоны «вода–суша»

3.3.1. Подходы к «топо-экологическому профилированию»

Контактные методы (картографические, ландшафтные полевые исследования) остаются важным источником достоверных и подробных данных об окружающей среде. Основные методы пространственного выделения ландшафтов «вода–суша» (ЛВС) – геоботанические и фитоценологические экологические исследования на побережье. Значительно реже проводят почвенные исследования, с бурением скважин и определением уровня грунтовых вод (УГВ). Еще реже и изучается фауна побережий при определении блоков ЛВС.

Дешифрирование переходных зон и крупных блоков ЛВС выполняется по картографическим (гипсометрическим) данным крупного масштаба от 1:50000. Применительно к лесной природной зоне используются существующие лесотаксационные карты заповедников и прочих особо охраняемых природных территорий (ООПТ), лесных хозяйств и других землепользователей. В степной и пустынной природной зоне это – фитоценологические карты.

Основной подход в ландшафтных исследованиях экотонных на побережье и в переходной зоне «вода–суша» – расширенный и усовершенствованный метод «комплексного топо-экологического профилирования», предполагающий сбор данных разных типов: геоморфологических, почвенно-геоботанических, микроклиматических флористических, ландшафтно-географических, зоологических. Одновременно с этим, производится географическая привязка всех объектов исследований (ландшафтов, фитоценозов, отдельных растений и животных), включая фотографический материал.

Комплекс полученных данных, взаимосвязанных в пространстве и времени, позволяет создать единую географическую информационную систему (ГИС), включающую базу данных (БД) по всем полевым наблюдениям на ключевых участках водоемов и их водосборов (Balyuk et al., 2007).

Характеристики выбранных ключевых участков, служат основой для экстраполяции получаемых результатов исследований на однотипные территории побережья с возможностью их зонирования, типизации, классификации.

3.3.2. Использование данных дистанционного зондирования и их дешифрирование

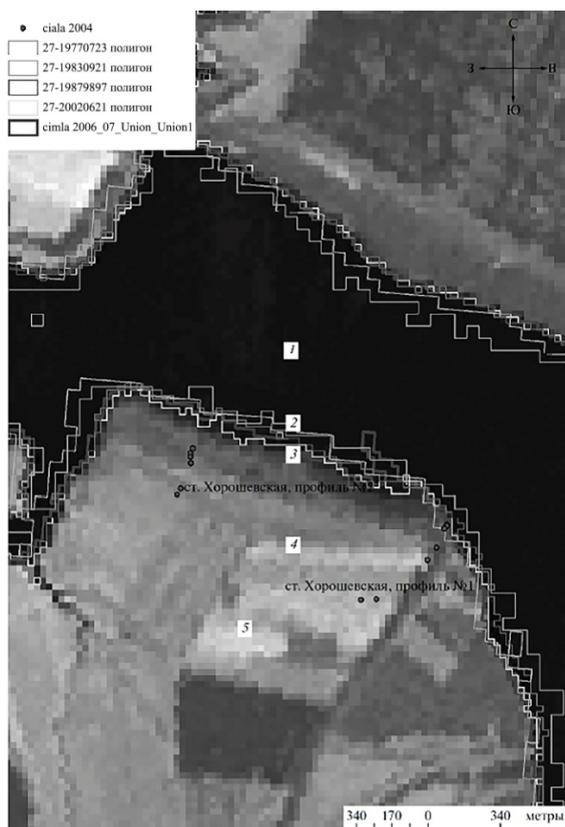


Рис. 3.1. Изменение береговой линии на одном из ключевых участков побережья Цимлянского водохранилища. Подложка – снимок Landsat (2007 г.), белые линии – контуры суши для контрастных уровней сработки водоема, номера – ЛВС по материалам полевых исследований.

следующие: 1) космоснимки отличаются регулярностью и высокой частотой обновления, в ряде случаев, до нескольких раз в сутки, что позволяет

Наряду с контактными исследованиями, существенно возрастает значение данных дистанционного зондирования водоемов и их водосборов. Современные высокотехнологичные методы бесконтактных исследований включают в себя: аэрофотосъемку на платформе БПЛА, спутниковые снимки в различных оптических диапазонах, а также радарные снимки и лазерное сканирование. Эти методы во многом дополняют традиционные полевые исследования и могут частично их заменить, позволяя автоматизировать мониторинг и сконцентрировать усилия специалистов по сбору контактных данных лишь на ключевых (контрольных) участках различных природных комплексов.

К особенностям использования спутниковых данных следует отнести

их использовать для непрерывного мониторинга территории; 2) спутниковая съемка одномоментно охватывает обширную территорию ($>10000 \text{ км}^2$), со средним пространственным разрешением 10–100 м/пиксель; 3) ежедневные снимки высокой актуальности отличаются сравнительно невысоким пространственным разрешением: $\geq 100\text{--}1000 \text{ м/пиксель}$.

Для выявления и мониторинга системы переходных зон ландшафта возможно использование снимков среднего пространственного разрешения (серия спутников Landsat с разрешением 15–60 м/пиксель). В целях оперативного мониторинга состояния акватории и побережья крупных равнинных водоемов удовлетворительный результат дают космоснимки низкого и среднего пространственного разрешения (спутники Aqua/Terra аппаратура MODIS, 250–1000 м/пиксель) (Кутузов, 2011; 2016).

Процедура выбора снимков для выделения контрастных элементов переходных зон ландшафта: «вода–суша» и переходная граница, предполагает определение их наибольшего спектрального контраста на анализируемых растровых рисунках (рис. 3.1). Водные поверхности обладают высокой поглощающей способностью (низкой спектральной яркостью отражения), особенно в длинноволновой части электромагнитного спектра (1.43 и 1.93 мкм), в то время как для растительного покрова в ближнем инфракрасном диапазоне проявляется максимум спектральной яркости (рис. 3.2). Влажные почвы выглядят значительно темнее сухих, что связано, в том числе со спектром поглощения воды. Это хорошо видно по минимумам на графиках влажных почв и растительности в зонах: 1.4 мкм и 1.9 мкм. На этих контрастах в отражении волн определенной длины волны строится анализ снимков и выделение интересующих объектов.

Спектры отражения природных объектов могут быть заимствованы из спектральных библиотек (ASTER Spectral Library, USGS Digital Spectral Library 06, Vegetation Spectral Library) с использованием коэффициентов спектральной яркости (рис. 3.3). Кроме того, широкий выбор природных объектов в цифровом и графическом виде представлен в книге Е.Л. Кринова (1947).

Для наземных участков ландшафта «вода–суша» часто используется «растительный» вегетационный индекс – $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной и RED – красной области спектра, а также комбинация различных спектральных каналов (Поддубный и др., 2022; Кутявина и др., 2020). Качественная и количественная характеристика развития высшей водной растительности в пределах аквального блока переходного ландшафта достаточно результативно описывается соотношением спектральных данных – «цветовым индексом» (Ерлов, 1980; Бука-

нова и др., 2011). Так снимки, полученные со спутников Aqua и Terra, с аппаратурой MODIS, обрабатывались на основе оценки «цветового индекса»: отношения λ_1/λ_2 сигналов для длин волн $\lambda_1 = 0.440\text{--}0.490$ мкм и $\lambda_2 = 0.540\text{--}0.560$ мкм. Первый диапазон длин волн соответствует максимуму показателя поглощения хлорофиллом «А», второй – его минимуму. Также хлорофилл «А» поглощает излучение в красной (около 0.675 мкм) зоне спектра. В связи с этим были выбраны отношения В10/В12 (и близкие В9/В11) каналов, радиометра MODIS, соответствующие спектральным диапазонам В10 = 0.483–0.493 мкм и В12 = 0.546–0.56 мкм (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Спектральные характеристики сканера MODIS (спутники Aqua/Terra)

№ канала	Длина волны, мкм	Применение	Название каналов (HDF слой)
1	0.62–0.67	Изменение растительного покрова	Red reflectance
2	0.841–0.876	Облачность, изменение растительного покрова	NIRreflectance
3	0.459–0.479		Blureflectance
4	0.545–0.565	Разделение почвы и растительности	MIRreflectance
5	1.23–1.25	Зеленая растительность	
6	1.628–1.652	Лиственный покров	
7	2.105–2.155	Разделение снега и облаков	
8	2.105–2.155	Облачность	
9	0.405–0.42	Хлорофилл	
10	0.438–0.448	Хлорофилл	
11	0.483–0.493	Хлорофилл	
12	0.526–0.536	Хлорофилл	
	0.546–0.556	Осадки	

Для определения границ ЛВС использовались мультиспектральные спутниковые данные среднего разрешения, полученные спутником Landsat-8. В расчете использовались данные двух спектральных каналов: 2 (0.450–0.515 мкм) и 3 (0.525–0.600 мкм). Индексы рассчитывались как отношение спектральных яркостей В2/В3. Следует отметить, что для спутника серии Ландсат (Landsat) – Ландсат-8, съемочная аппаратура представлена спектро-скопом OLI¹ (табл. 3.2).

Аппаратура спутника серии Сентитнел (Sentinel, Sentinel-2) – спектро-скоп MSI² (табл. 3.3).

Соотношение каналов съемки разными космическими аппаратами и спектра отражения для типичного объекта – трава, представлены на рис. 3.4. Основной отражающий компонент здесь – хлорофилл, широко представленный в период вегетации на суше и водной среде комплексом микроскопических фотосинтезирующих организмов – фитопланктоном и макрофитами.

¹ https://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/20101119_-LDCMbrochure.pdf

² <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>; https://lta.cr.usgs.gov/sentinel_2

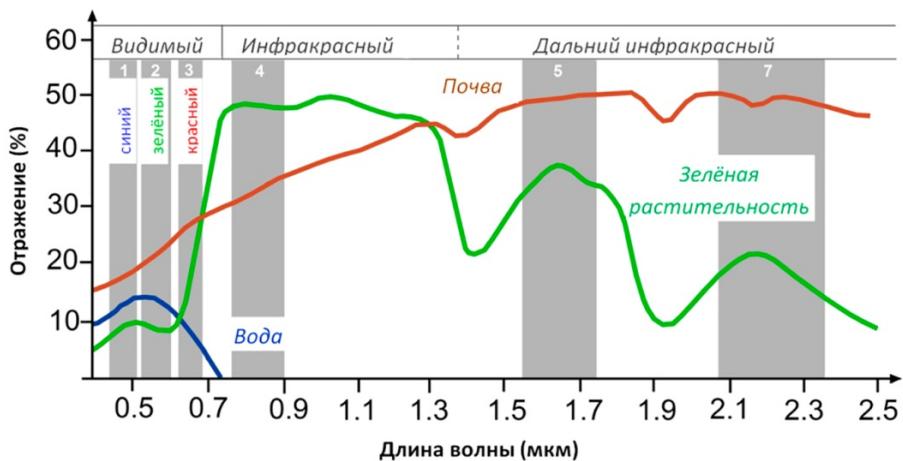


Рис. 3.2. Отражение воды, почвы и растительности на разных длинах волн TM Landsat. Каналы: 1 – (0.45–0.52 мкм), 2 – (0.52–0.60 мкм), 3 – (0.63–0.69 мкм), 4 – (0.76–0.90 мкм), 5 – (1.55–1.75 мкм) и 7 – (2.08–2.35 мкм).

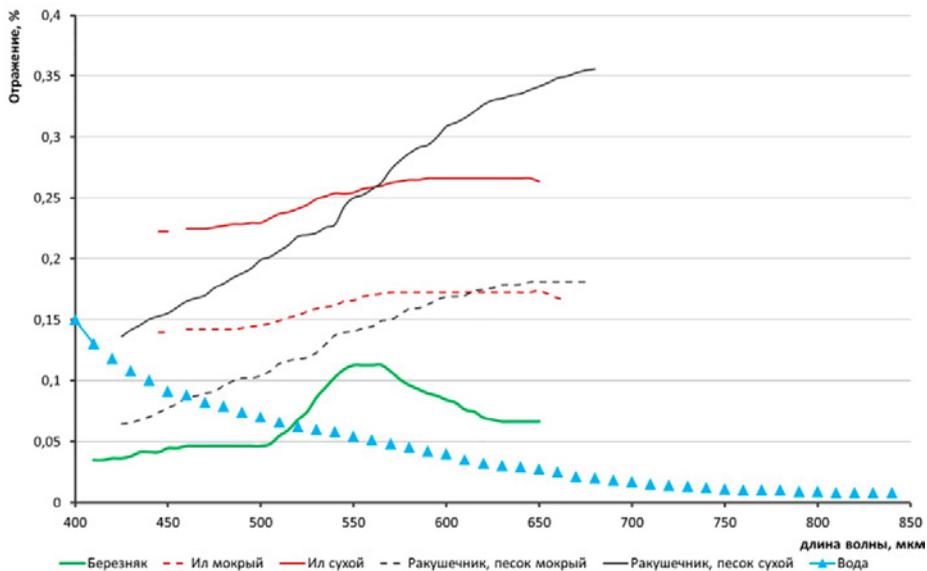


Рис. 3.3. Отражательная способность природных объектов.

Таблица 3.2. Диапазон снимков OLI

Спектральный канал	Длины волн	Разрешение (на один пиксель)
Канал 1 – побережья и аэрозоли (Coastal/Aerosol, NewDeepBlue)	0.433–0.453 мкм	30 м
Канал 2 – синий (Blue)	0.450–0.515 мкм	30 м
Канал 3 – зеленый (Green)	0.525–0.600 мкм	30 м
Канал 4 – красный (Red)	0.630–0.680 мкм	30 м
Канал 5 – ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0.845–0.885 мкм	30 м
Канал 6 – ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1.560–1.660 мкм	30 м
Канал 7 – ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2.100–2.300 мкм	30 м
Канал 8 – панхроматический (Panchromatic, PAN)	0.500–0.680 мкм	15 м
Канал 9 – перистые облака (Cirrus, SWIR)	1.360–1.390 мкм	30 м
Канал 10 – дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10.30–11.30 мкм	100 м
Канал 11 – дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11.50–12.50 мкм	100 м

Таблица 3.3. Спектральные каналы для мультиспектрального прибора (MultiSpectralInstrument – MSI) для спутников Сентинел-2 (Sentinel-2) датчики (S2A и S2B)

Но- мер ка- нала	Датчики				Пространствен- ное разрешение (м)
	S2A		S2B		
	Центр канала (нм)	Ширина канала (нм)	Центр канала (нм)	Ширина канала (нм)	
1	443.9	27	442.3	45	60
2	496.6	98	492.1	98	10
3	560.0	45	559	46	10
4	664.5	38	665	39	10
5	703.9	19	703.8	20	20
6	740.2	18	739.1	18	20
7	782.5	28	779.7	28	20
8	835.1	145	833	133	10
8a	864.8	33	864	32	20
9	945.0	26	943.2	27	60
10	1373.5	75	1376.9	76	60
11	1613.7	143	1610.4	141	20
12	2202.4	242	2185.7	238	20

3.3.3. Анализ космоснимков в географической информационной системе

Очевидно, что процедура выбора снимков для выделения контрастных элементов в ландшафтах побережья – многоступенчатый процесс. Следующий этап исследований заключается в дешифрировании и анализе спутниковых снимков с применением географической информационной системы – программы управления базами данных с географической (пространственной) привязкой и визуализацией картографических материалов. Возможности современной ГИС заключают в себе накопление данных в режиме реального времени, обработку и анализ информации, оперативную выдачу автоматических отчетов и карт для принятия соответствующих решений.

Для совместной обработки дистанционных и контактных данных о распределении тех или иных параметров акватории (термин введен К.К. Эдельштейном в 1998 г.) и совмещения с изображениями, полученными из космоса, необходимо учитывать даты съемки используемых спутников. Поскольку данные контактных исследований разнородны, требуется их предварительная обработка: сведение разноформатных материалов, унификация и верификация табличных данных по материалам подспутниковых исследований.

В процессе накопления данных, включая и полевые работы, используется географическое позиционирование приборами спутниковой навигации (GPS/GLONASS), спутниковые снимки, топографические карты с координатной привязкой в ГИС, программное обеспечение для ГИС и соответствующее оборудование, что позволяет точно ориентироваться на местности при выборе контрольных точек для исследований и сбора данных. В качестве примера на рисунках 3.5 и 3.1 показано использование спутниковых снимков разного пространственного разрешения, с последовательным увеличением масштаба. Приведенный цветной фрагмент рисунка 3.5 – синтезированный спутниковый снимок (Landsat-7) в «почти естественных» цветах. Наличие комбинации спектральных каналов, позволяет явно различить воду, вегетирующую растительность и распаханые участки (красные оттенки). На фрагменте снимка (Landsat-7) в ближнем инфракрасном диапазоне четко видны границы воды. Светлым контуром очерчены границы векторного слоя данных уровней заливания побережья. Увеличение градиента черного цвета указывает на интенсификацию влажности ландшафта. Снимки MODIS (спутники Aqua/Terra) – удобны для оперативного мониторинга изменений в ландшафтах, но из-за низкого пространственного разрешения могут достаточно грубо отражать общие тенденции по изменению влажности в пределах ландшафта.

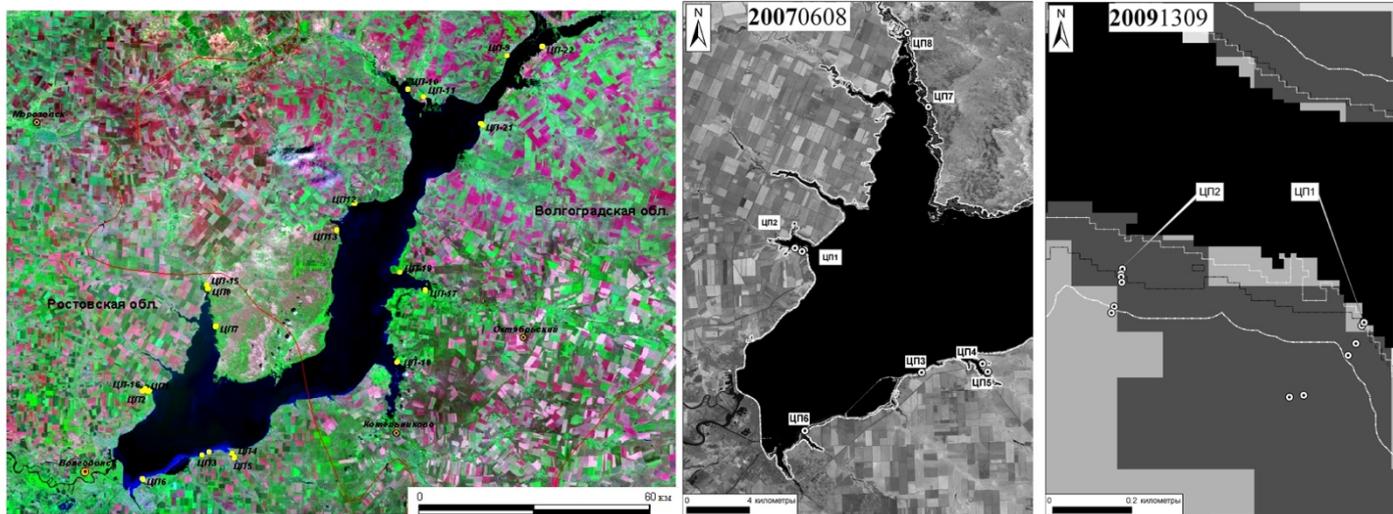


Рис. 3.5. Расположение слоя данных – цимлянские профили (ЦП 1-22) на спутниковых снимках ГИС-проекта «Цимлянское водохранилище» в разных масштабах. Левый цветной фрагмент рисунка: желтыми метками отмечены точки замеров комплексного топо-экологического профилирования по итогам многолетних наблюдений (спутник Landsat-7).

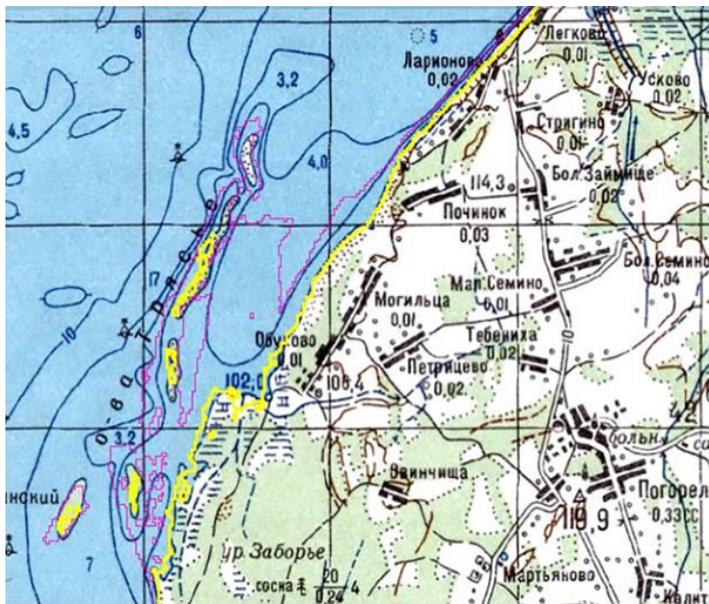


Рис. 3.6. Проведение внешних границ защищенных мелководий по топографической основе с учетом полученных векторизацией ДЗЗ дополнительных данных. Желтый и розовый контуры соответственно для уровней 101.81 м и 100 м.

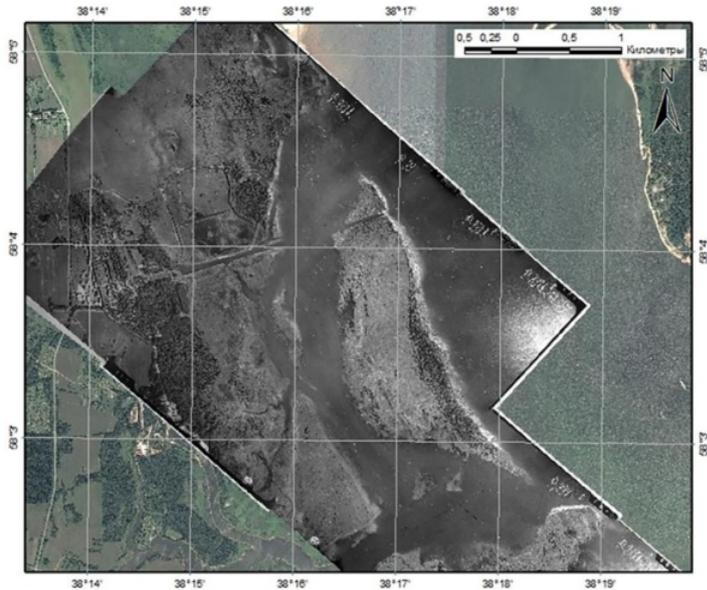


Рис. 3.8. Данные аэрофотосъемки 1989 г. после географической привязки совпадают по контурам с современными спутниковыми материалами.

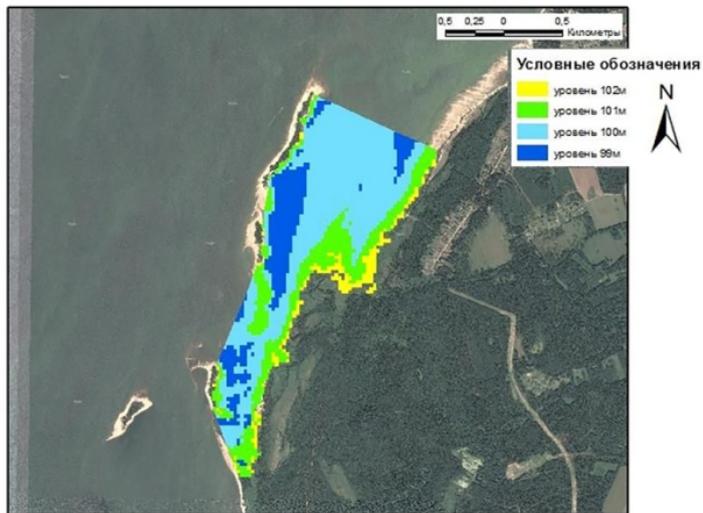


Рис. 3.7. Площади затопления для разных уровней вод водохранилища, вычисленные по материалам ДЗЗ. Подоснова – спутниковый снимок.

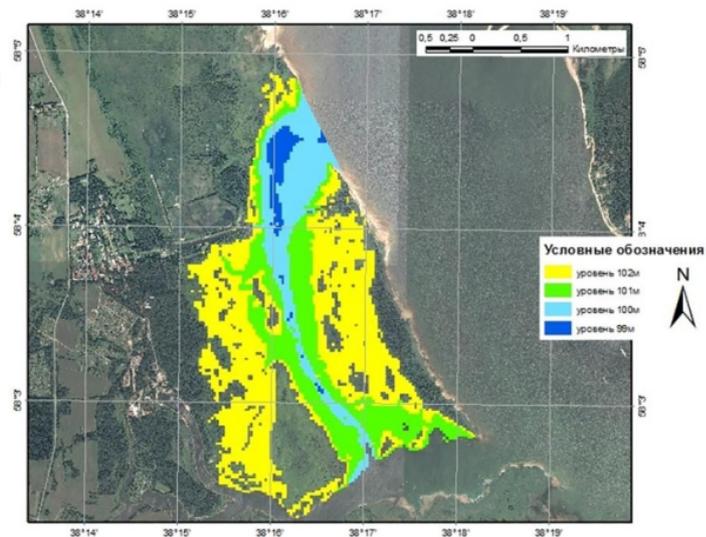


Рис. 3.9. Контуры мелководья при уровне близком к НПУ.

3.4. Ошибки методов выделения переходных зон ландшафта

При оценке точности выделения ландшафта (экотона) «вода–суша» следует учитывать, что он представляет собой переходную зону между соседними экосистемами и характеризуется широкой границей с размытыми краями. Для четкого выделения пространственных границ таких ландшафтов требуется переформулировать их «описательное» определение в «структурное», с четкими формальными численными характеристиками разграничительных линий в блоках экотона (Балюк, Кутузов 2007). Для прибрежных мелководных экосистем самая очевидная граница ЛВС – водная поверхность и наземная часть ландшафта.

Точность определения по космоснимкам таких формальных (условных) границ ЛВС определяется масштабами его блоков (от метров до километров) и точностью (пространственной разрешающей способностью) снимков: от 250 м/пиксель для MODIS до 15–30 м/пиксель (Landsat), от 10–20 м/пиксель (Sentinel-2) до 2 м/пиксель SeaView-2. Следовательно, точность определения площади блоков ЛВС определяется соотношением между величинами масштаба блока – a и пространственного разрешения снимка – b . Учитывая, что пиксель, приходящийся на границу контура блока, может быть отнесен к любому из блоков (значение осредняется по блоку, куда приходится $>50\%$ пикселей), точность определения границы блока ЛВС по формальному показателю составляет $\frac{1}{2}$ пикселя космоснимка. Следовательно, точность определения площади блока определяется соотношением между количеством пикселей внутри проведенной границы N и протяженностью границы (в пикселях) $\frac{1}{2}n$:

$$P(\%) = N / \left(N + \frac{1}{2}n \right) 100,$$

где $P(\%)$ – точность определения блока ЛВС, N – число пикселей в контуре (удовлетворяющих выставленному условию), n – число «пограничных» пикселей. В итоге, ошибка определения геометрии и площадей блоков ЛВС по снимкам обычно находится в теоретических пределах: от 0.3% для побережий крупных озер до 50% для узких лентовидных форм и мелко мозаичных структур, где масштаб пикселя сравним с шириной (диапазоном) блока ЛВС. При необходимости большей дробности выделения достаточно разово привлечь в качестве топографической основы снимок более высокого пространственного разрешения. В целом погрешность определения контуров и площадей традиционными картографическими и описанными выше методами не должна превышать 5–10%.

3.5. Результаты использования данных ДЗЗ, при создании ГИС ландшафтов побережий крупных водохранилищ

Важнейшими показателями гидрологического режима водохранилищ выступают их межгодовые, сезонные, суточные и внутрисуточные колебания уровня воды. В результате многолетних и сезонных колебаний уровня может происходить продолжительное по времени изменение морфометрических характеристик водоемов, что в первую очередь влияет на состояние абиотических и биотических показателей мелководных экосистем (Буторин, Успенский, 1984; Поддубный, 2013). Известно, что мелководная зона водохранилищ гидрологически неоднородна. Основные виды литоральных зон, определяющие абиотическую и биотическую структуру прибрежных экосистем, – это открытые и защищенные мелководья. Несмотря на незначительные площади, относительно общей акватории водохранилищ защищенные мелководья – важный элемент в функционировании экосистем, поскольку представляют собой своеобразные буферные зоны, трансформирующие твердый, химический и биогенный сток с суши. Здесь же наиболее активно происходят процессы самоочищения воды (Шашуловская, 2010).

В наибольшей степени подвержены влиянию сезонных изменений уровня воды защищенные мелководья крупных водохранилищ многолетнего регулирования стока (например, Рыбинского и Куйбышевского). В частности, для Рыбинского водохранилища было показано, что его уровень воды к концу навигации в среднем многолетнем плане понижается на 1.5 м. В аномальные годы навигационное понижение уровня может составить 1.9 м. В этом случае из 154 защищенных мелководий общей площадью 139 км² полностью обсыхают 82 мелководья на площади 32.5 км². Уменьшаются в размерах сохраняя свою структуру 55 мелководий с суммарной площадью 104 км². Полностью изолированными от открытой части водоема остаются 9 участков (малых водоемов) с суммарной площадью 1 км² (Поддубный, 2013). Следовательно, подробное знание морфометрии защищенных мелководий позволит прогнозировать изменения их ложа, отследить негативное воздействие на биоту и наметить пути реконструкции всего мелководья или отдельных его участков.

Возможности построения цифровых карт морфометрии отдельных защищенных мелководий были выполнены применительно к Рыбинскому водохранилищу. На основе обработки выборки спутниковых снимков (данных ДЗЗ) на периоды контрастных уровней стояния вод водохранилища, в ГИС проводилась последовательная векторизация его контуров. По использованному ранее алгоритму определения границы «вода–суша»

на основе оценки спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне (Кутузов, 2011), создавались полигональные объекты, соответствующие территориям затопления. В итоге на основе обработки выбранных данных ДЗЗ были получены векторные слои в период с 2013 по 2019 гг. Граница мелководий проводилась по наибольшей глубине распространения высшей водной растительности, которая составляла ~3 м (рис. 3.6). В соответствии с выбранными внешними границами защищенных мелководий, в результате геопространственных операций со снимками ДЗЗ в ГИС, формируются взаимосвязанные контуры площадных объектов – зон затопления (рис. 3.7).

Расчеты площадей ведутся в электронной таблице, на основе расчетных данных ГИС «Акватерра» по площади геометрических объектов. Объем вычисляется по известной формуле усеченной пирамиды (Эдельштейн, 2015): $V = \frac{1}{3} / H((S + S_1 + \sqrt{S \times S_1})$, где S – вся площадь заливания предыдущего высотного уровня («суммарная площадь» в таблице), а S_1 – «суммарная площадь» интересующего уровня. Далее численные данные округляются с учетом средней точности измерений по пространственному линейному разрешению использованных ДЗЗ, оцениваемому в 30 м и по площади в 1000 м². Для определения объема глубоководной части защищенных мелководий – ниже уровня 99 м (БС) спутниковых данных нужного качества нет. Оценить приблизительный объем акватерритории ниже 99 м можно на основе топографических и навигационных карт, согласно которым глубины при 99 м будут колебаться от 0.2 м до 1 м со средним значением 0.6 м (табл. 3.4).

Аналогично для другого крупного заостровного защищенного мелководья в Волжском плесе водохранилища к ранее использованным слоям в ГИС проекте «Акватерра» были добавлены серии снимков аэрофотосъемки 1989 г. После проведенной географической привязки получено достаточно хорошее совпадение контуров объектов мелководья по данным аэрофотосъемки со спутниковыми материалами текущего десятилетия (рис. 3.8). На снимках видно, что массив острова сохраняет те же контуры и на современных ДЗЗ при среднем уровне Рыбинского водохранилища в навигационный период ~100.5 м БС. При уровне близком к НПУ (101.81 м БС) от острова остается узкая полоса, поросшая сосняком. Основной массив острова в это время затоплен, что заметно на снимках в начале вегетационного периода (апрель–май) и маскируется позже надводными макрофитами (тростник и камыш), массово произрастающими на мелководьях (рис. 3.9). ГИС обработка данных ДЗЗ по контурам уровней воды позволяет вычислить морфометрические характеристики данной акватерритории (табл. 3.5).

Таблица 3.4. Суммарные показатели морфометрии защищенного мелководья карманного типа в Волжском плесе Рыбинского водохранилища (цветом выделены скорректированные данные)

Интервал глубин, м	Полная площадь, км ²	Объем, 10 ³ м ³	Суммарный объем, 10 ³ м ³
<99	0.423	85	85
99–100	1.654	971	1055
100–101	2.182	1912	2967
101–102	2.339	2260	5228

Таблица 3.5. Суммарные показатели морфометрии заостровного мелководья в Волжском плесе Рыбинского водохранилища, цветом выделены скорректированные данные для уровня менее 99 м (БС)

Интервал глубин, м	Полная площадь, км ²	Объем, 10 ³ м ³	Суммарный объем, 10 ³ м ³
<99	0.189	38	38
99–100	1.099	581	619
100–101	2.495	1750	2370
101–102	5.357	3836	6206



Юрий Павлович Чалов
17.03.1946–27.02.1999

Закончил Ярославский медицинский институт, лечебно-профилактическое отделение. Работал в институте с марта 1983 г. по специальности «биохимия». Специализировался в области экологической биохимии рыб. С февраля 1989 г. работал в ВЦ ИБВВ РАН. Занимался автоматизацией научных исследований с применением средств вычислительной техники. Под его руководством выполнен ряд разработок для обеспечения перспективных научных исследований: методы цифровой обработки многоканальных спутниковых

изображений для идентификации гидрологических процессов, водной растительности; цифровая обработка микроскопических изображений биологических объектов; машинный анализ в реальном времени пищевого поведения рыб, локомоторных реакций низших ракообразных в средах разной токсичности; обширная библиотека программных модулей для быстрой компоновки программных средств решения различных задач автоматизации научных исследований с использованием средств вычислительной техники.

3.6. Оценка структуры абиотических полей внутреннего водоема по данным дистанционного зондирования

К первым исследованиям структуры гидрофизических и гидробиологических полей во внутренних водоемах по данным ДЗЗ применительно к Рыбинскому водохранилищу следует отнести работы сотрудника ИБВВ

РАН Ю.П. Чалова, являющиеся в некотором роде продолжением комплексного проекта «Интеркосмос» – «Внутренние водоемы» (п. 3.2), но выполненные на другом более качественном уровне спустя 7 лет (1994 г.) после завершения проекта «Интеркосмос». В результате кропотливой работы в сентябре 1996 г. был подготовлен материал о возможности оценки мезоструктуры абиотических полей в Рыбинском водохранилище по данным дистанционного зондирования. В силу тяжелой болезни и безвременной кончины Ю.П. Чалова эта работа не была опубликована. Мы сочли целесообразным привести основные положения и результаты неопубликованной статьи Ю.П. Чалова как первого опыта применения данных ДЗЗ для комплексного изучения функционирования пресноводных экосистем.

3.6.1. Мезоструктура абиотических полей на акватории Рыбинского водохранилища по данным дистанционного зондирования

Дистанционная и контактная информация. В мае–июне 1994 г. На акватории Рыбинского водохранилища Институтом биологии внутренних вод РАН совместно с Институтом космических исследований РАН проводился двухуровневый спутниковый эксперимент с целью изучения мезомасштабного распределения гидрофизических и гидрохимических полей на акватории водоема методами спутниковой гидроэкологии. Прием и преобразование дистанционной информации с метеорологических спутников серии NOAA выполнялась на станции «Scanog» (ИКИ РАН) с 17 мая по 9 июня 1994 г. Синхронная с пролетом спутника контактная информация собиралась на акватории водоема с борта научно-исследовательского судна «Борок».

Для синхронной обработки дистанционной и контактной информации использовался фрагмент спутникового снимка размером 128×128 пикселей со сдвигом от начала строки 1282 пикселя, полученный в режиме HRPT с пятиканального радиометра AVHRR спутника NOAA-12 на восходящей траектории в 18 ч 34 мин местного времени. Синхронные контактные измерения на акватории водоема производились 6 июня 1994 г. с 8 ч 00 мин до 23 ч 20 мин по 7 параметрам на 30 станциях, расположенных преимущественно вдоль судовых ходов в Главном, Волжском и Шекснинском плесах водохранилища. Географическая привязка станций осуществлялась по гидрографической сети судовых буев с точностью 0.5 км. В поверхностном слое воды на глубине 0.5 м стандартными методами регистрировались температура, электропроводность, кислотность, концентрация кислорода, цветность, флуоресценция хлорофилла. На каждой станции также измерялась прозрачность воды диском Секки, температура и скорость ветра в приводном слое воздуха. Эксперимент проводился в межпиковый сезон размножения водорослей, при слабом, но устойчивом юго-юго-восточном

ветре до 3 м/с, установившемся за трое суток до начала проведения работ на водоеме.

Тематическая обработка данных. Тематическая обработка спутниковой и синхронной контактной информации выполнялась на комплексе цифровой обработки изображений «СВИТ» с помощью разработанных в ИБВВ РАН программных средств и включала: фильтрацию полупрозрачных облачных структур и атмосферной дымки на всех каналах радиометра AVHRR методом главных компонент (Благуш, 1989; Wheate, Franklin, 1991; Lark, 1995) (рис. 3.10); геометрическую коррекцию спутниковых снимков по системе наземных контрольных точек со среднеквадратичными ошибками по осям X и Y соответственно 0.787 и 1.047 пикселя; восстановление двумерных полей распределения абиотических параметров на акватории водоема по данным дистанционного зондирования и синхронных контактных измерений (Baranowska, 1991; Kondratyev et al., 1994).

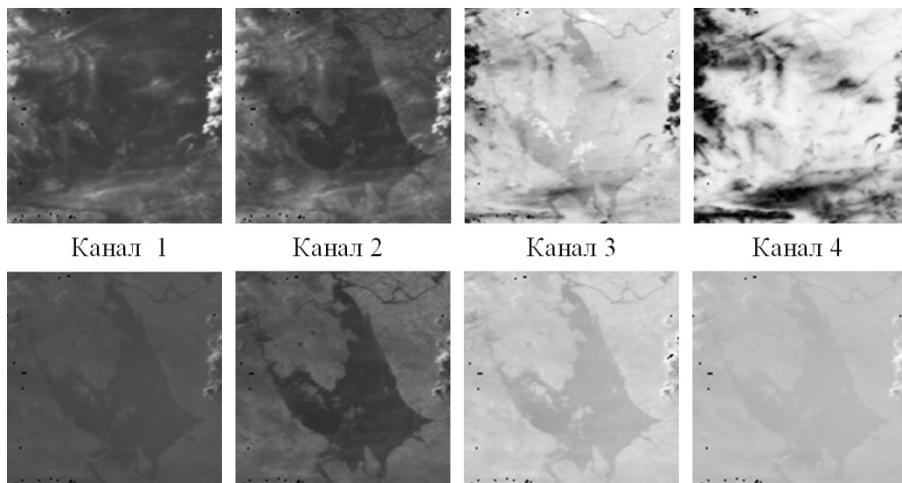


Рис. 3.10. Фильтрация облачных структур методом главных компонент. Верхний ряд – фрагменты исходных снимков водохранилища на 1–4 каналах AVHRR NOAA-12; нижний ряд – отфильтрованные изображения подстилающей поверхности.

Восстановление полей температуры поверхности воды (ТПВ), электропроводности поверхностного слоя воды и концентрации кислорода на акватории водоема проводилось путем установления линейных корреляционных зависимостей между данными дистанционного зондирования и синхронно измеренными на водоеме контактными данными с привлечением аппарата множественной линейной регрессии (Buttner et al., 1987; Choubey, 1994). В исследуемых регрессионных моделях в качестве неза-

висямой переменной использовались соответствующие контактные данные, измеренные на сети станций водоема. Зависимыми переменными уравнений выступал набор данных дистанционного зондирования, который, кроме пятиспектральных каналов AVHRR (переменные X_1 – X_5), включал три дополнительных «виртуальных» канала: X_6 – разность радиационных температур 4 и 5 каналов (T_4 – T_5); X_7 – переменная X_6 с поправкой на секанс угла сканирования вдоль строки изображения $(T_4$ – $T_5) \times (\text{Sec}-1)$; X_8 – нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI), который определяется (Gutman, 1994; Tateishi Kajiwara, 1994) как: $NDVI = (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1)$, где A_1 и A_2 , соответственно, альbedo 1-го и 2-го каналов AVHRR (аналогично п. 3.3.2).

Все переменные, используемые при расчетах уравнений регрессии, нормированы приведением к виду: $x_n = (x_i - \bar{x}) / s$, где: x_n – нормированное значение переменной; x_i – i -тое значение переменной; \bar{x} – среднее выборки; s – стандартное отклонение выборки. На первом этапе каждая регрессионная модель для температуры, электропроводности и концентрации кислорода строилась с использованием всего набора зависимых переменных. На втором этапе, для получения статистически устойчивых решений (Рождественский, Чеботарев, 1974), выполнялось исключение зависимых переменных, имеющих недоверенные для 5%-ного уровня значимости значения коэффициентов регрессии. На третьем этапе отобранные уравнения регрессии использовались для восстановления двумерных полей распределения абиотических параметров на акватории водохранилища.

Оценка качества восстановления абиотических полей осуществлялась путем сравнения дисперсий и средних восстановленных двумерных полей с дисперсиями и средними соответствующих контактных данных. В результате выявлено, что различие средних восстановленных полей и соответствующих контактных данных незначительно при 5%-ном уровне значимости. Достоверное отличие дисперсии поля электропроводности поверхностного слоя воды от дисперсии контактных измерений этого параметра, выполненного на акватории водоема, по-видимому, связано либо с неудачной геометрией станций, расположенных преимущественно в пелагиале водоема вдоль судовых ходов с перемешанными по вертикали слоями воды, либо – с их небольшим числом. В связи с вышесказанным мы не будем рассматривать распределение электропроводности воды по восстановленным данным ДЗЗ.

Характеристика абиотических полей, полученных регрессионными методами. Распределение поля температуры поверхностного слоя воды (ТПВ) в пелагиали имеет довольно сложный характер. В данном случае достоверность распределения ТПВ реальным условиям сложно интерпретировать.

Как было показано ранее (Поддубный, Сухова, 2002), горизонтальное распределение температуры воды в большей степени определяется характером горизонтальной циркуляции водных масс. В данном случае не ясно происхождение трех ядер холодной воды в Волжском плесе, западной части Главного плеса и в Шекснинском плесе (рис. 3.11). В Главном плесе, наблюдается плавное нарастание температуры в направлении от юго-западных к северо-восточным его границам. Там же обнаруживаются два теплых ядра в поверхностном слое воды. Предположительно теплые аномалии могут быть связаны с формированием в этих районах циркуляционных образований антициклонического и циклонического характера. Следует заключить, что данная пространственная структура градиента температур поверхностного слоя воды, зафиксированная ИК-датчиками спутникового радиометра в конце светового дня, по-видимому, устанавливалась в течение нескольких суток, предшествующих эксперименту.

Концентрация кислорода в поверхностном слое воды. К общим закономерностям распределения данного поля на акватории водоема следует отнести высокую концентрацию кислорода, поступающего с речным стоком впадающих в водохранилище рек, а также постепенное увеличение концентрации кислорода к северо-восточным границам озерной части водоема (рис. 3.12). В пелагической части водохранилища обнаруживается три ядра водных масс со сниженной концентрацией кислорода (7.5 мг/л и ниже). Как и распределение температуры воды, они могут быть связаны с характером циркуляции водных масс. Используя строгие функциональные зависимости, выявленные ранее теоретическим или эмпирическим путем между некоторыми абиотическими параметрами и располагая восстановленными первичными полями распределения этих абиотических параметров на акватории водоема, технически не сложно рассчитать производные или вторичные поля абиотических параметров.

Поток кислорода через поверхность водоема. Располагая полями ТПВ, концентрации кислорода в поверхностном слое воды, скалярным полем усредненной скорости ветра в приводном слое воздуха (рис. 3.13), а также величиной атмосферного давления над акваторией водоема, можно рассчитать (Мизандронцев и др., 1993, 1995) результирующий поток кислорода через поверхность водоема: $F_{O_2} = k(1 + 0.27W^2)(pO_{2A} - pO_{2B})$, где: F_{O_2} – поток кислорода через поверхность водоема, мг/м² × сут; k – константа скорости обмена, мг/м² × атм × сут; W – скорость ветра в приводном слое воздуха, м/с; O_{2A} – парциальное давление кислорода в приводном слое воздуха, атм; pO_{2B} – парциальное давление кислорода в поверхностном слое воды, атм. Все указанные переменные рассчитывались для каждого пикселя двумерного поля потока кислорода.

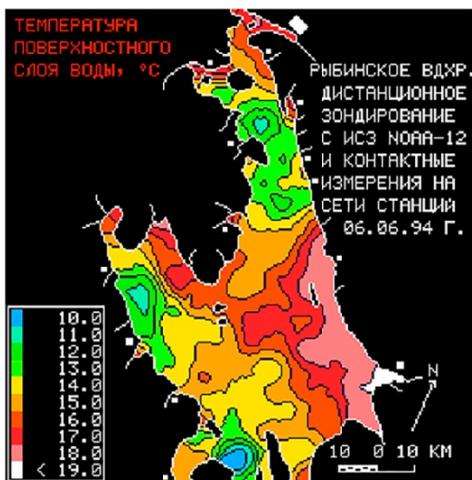


Рис. 3.11. Распределение температуры поверхностного слоя воды 06.06.1994 г.

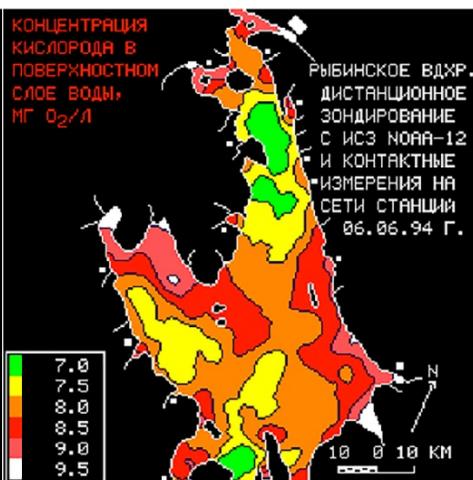


Рис. 3.12. Распределение концентрации кислорода в поверхностном слое воды 06.06.1994 г.

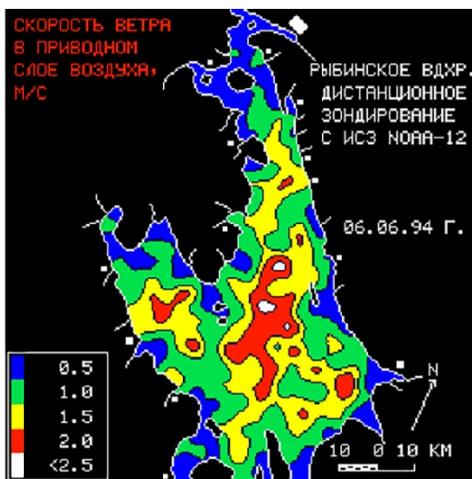


Рис. 3.13. Скорость ветра в приводном слое воздуха 06.06.1994 г.

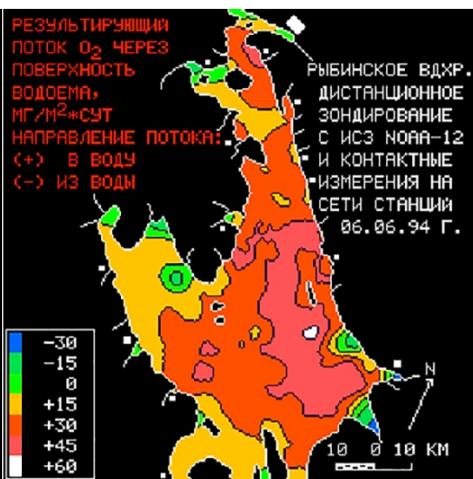


Рис. 3.14. Результирующий поток O_2 через поверхность водоема 06.06.1994 г.

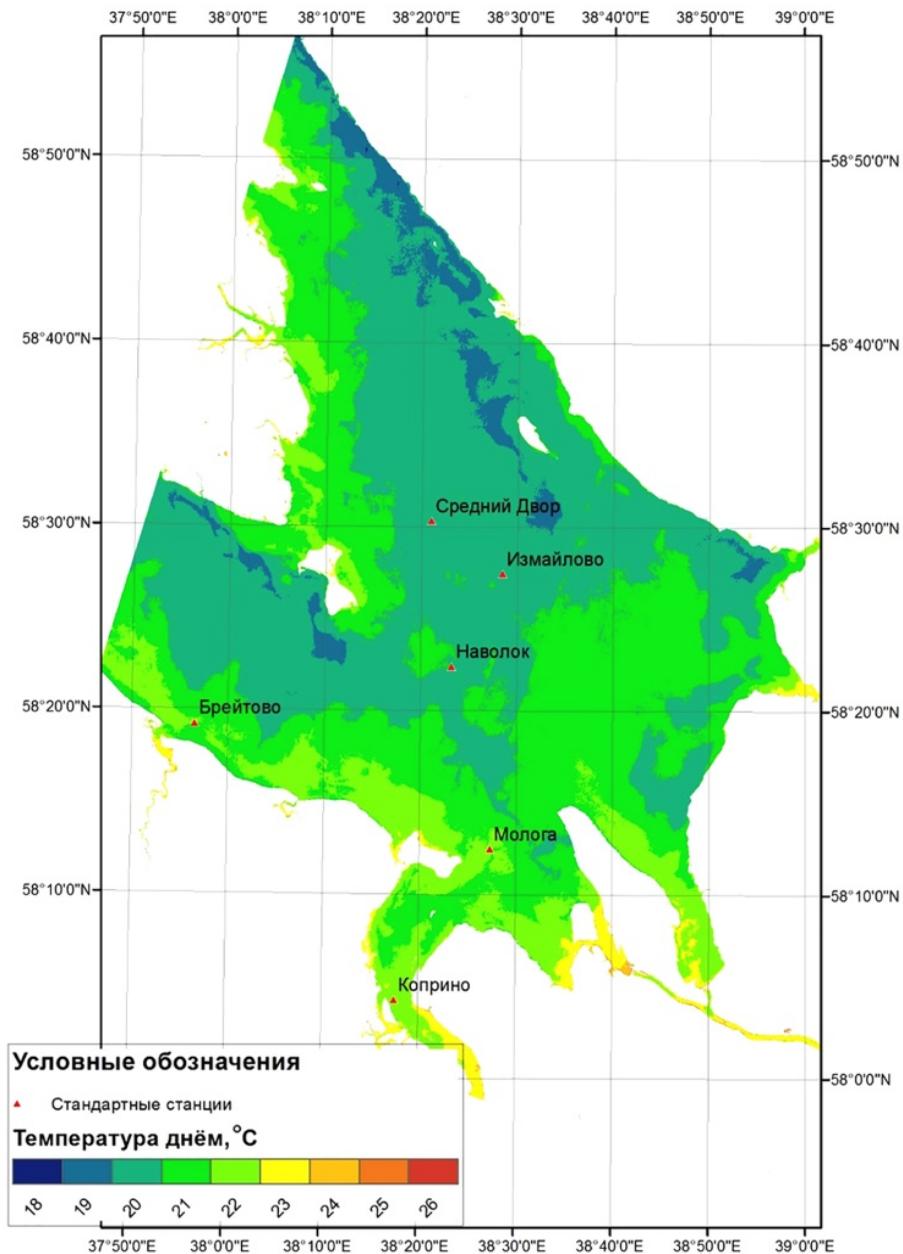


Рис. 3.15. Распределение температуры воды на поверхности Рыбинского водохранилища по данным ДЗЗ с 01 по 03.07.2022.

Скорость ветра в приводном слое воздуха вычислялась через скорость течения по формуле (Михайлов и др., 1991): $V = 0.0127W/\sqrt{\sin \varphi}$, где: W – скорость ветра в приводном слое воздуха, м/с; V – скорость течения в поверхностном слое воды, м/с; φ – географическая широта, рад. Векторное поле скорости течения в поверхностном слое воды рассчитывалось путем поиска максимума кросс-корреляции пассивных трасеров течений на двух последовательных снимках акватории водоема (Гончаренко и др., 1993; Wu et al., 1992). Скорость ветра рассчитывалась по усредненным в окне 7×7 пикселей векторам поверхностных течений. В итоге вычисленные величины потоков кислорода через поверхность водохранилища лежат в диапазоне от -46.78 до $+61.26$ при средней величине потока $+16.53 \text{ мг/м}^2 \times \text{сут}$ и стандартном отклонении 11.53 . Таким образом, на 92.29% акватории водоема может наблюдаться поглощение кислорода из атмосферного воздуха, которое достигает максимальных величин в центральной и северной частях Главного плеса (рис. 3.14).

Следует отметить, что спутниковый эксперимент проводился в период, когда весенний пик вегетации водорослей, в связи с прогревом воды, пошел на спад, а температурный оптимум для развития летних форм фитопланктона еще не был достигнут, т.е. фотосинтетическая продукция кислорода на большей части акватории водоема, с учетом сезонной динамики, должна находиться на достаточно низком уровне (Рыбинское водохранилище..., 1972). В общем случае, это предположение соответствует полученным данным о преобладании процессов инвазии кислорода на большей части акватории водоема.

3.6.2. Определение температуры воды на поверхности водоема по данным ДЗЗ (современные исследования)

Возможность определения температуры поверхностного слоя воды в водоеме на основе ДЗЗ рассмотрим на примере Рыбинского водохранилища. Информация о температуре воды получена со спутника Landsat 8–9 (датчик: Surface Temperature-ST). Дешифрирование космического снимка произведено с использованием следующей информации: 1 теплового инфракрасного датчика (TIRS) – 10 канал, параметров верхней части атмосферы (TOA), отражательной способности, яркостной температуры (BT), материалов усовершенствованного космического радиометра теплового излучения и отражения (ASTER), набора данных о мировой излучательной способности (GED), нормализованного вегетативного индекса ASTER (NDVI), данных и атмосферных профилей геопотенциальной высоты, удельной влажности и температуры воздуха.

Конкретные сведения об алгоритме ST приведены в разделе 4.7 калибровки и поверки Landsat 8–9 (Cal/Val). Используемые радиометры: Thermal Infrared Sensor (TIRS)¹, Landsat 8–9 Operational Land Imager и кол-лекция тепловых инфракрасных датчиков 2, данные уровня 1².

Таблица 3.6. Температура поверхности воды Рыбинского водохранилища (Т°С), измеренная контактным способом и дешифрированная по данным ДЗЗ (Landsat 8–9) в июле 2022 г.

Станция	ДЗЗ	Измеренная		Приведенная к 01–03.07	Δ Т
	01–03.07	28.06	11.07		
Коприно	21.4	23	23.2	23.1	0.7
Молога	20.1	1.7	22.3	21.9	0.8
Наволоч	19.9	0	22	20.6	0.7
Измайлово	19.4	0.9	22.5	21.4	1,0
Средний Двор	19.5	9.8	22.3	20.6	1.1
Брейтово	21.1	1.8	21.5	21.7	0.6

Указанные материалы со спутников Landsat 8–9 использованы при создании карты распределения дневных температур воды (°С) в пределах акватории Рыбинского водохранилища для периода с 01 по 03.07.2022 г. Следует отметить отсутствие пояснений для однозначной интерпретации данных, полученных в описанном алгоритме обработки информации. Кроме того, в исходных данных и в итоговых материалах заметны явные артефакты (в виде широких полос), которые требуют дополнительных процедур анализа и обработки. В целом они незначительно влияют на общую картину распределения температур в пределах акватории.

Полученная тепловая карта иллюстрирует возможности ДЗЗ для выявления общих закономерностей распределения температуры воды на разных участках водоема. В частности, достаточно хорошо выделяются более прогретые водные массы (21–22°С) на мелководьях и прилегающих глубоководных участках водохранилища, локальные более холодные аномалии в западной и северной частях водоема (19°С). Большую часть водохранилища занимают обширные зоны с температурой 20°С (рис. 3.15). Вместе с тем, небольшие участки акватории с повышенными температурами: 23–24°С требуют дополнительных комментариев и детального анализа. Последующее сравнение данных спутниковой съемки и измеренных значений температуры воды на стандартных станциях водохранилища

¹ https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1747_Landsat8-9_CalVal_ADD-v4.pdf – дата доступа 04.02.2023.

² <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-operational-land-imager-and> – дата доступа 04.02.2023.

в конце июня и начале июля показало их удовлетворительное соответствие (табл. 3.6). Точность дешифрирования ДЗЗ изменялась от 0.6 до 1.1 и в среднем составила 0.8°C.

Очевидно, что получаемые картины распределения температур, как и их абсолютные значения, будут меняться в зависимости от сезона, метеоусловий и режима работы водохранилища.

3.6.3. Использование ДЗЗ при картографировании распределения фитопланктона на внутренних водоемах (современные исследования)

Планктонные водоросли, вызывающие «цветение» воды и влияющие на ее качество, особенно бурно развиваются вблизи берегов крупных водоемов, где есть стоки вод, вызывающие повышенную эвтрофикацию водоема. Фитопланктон оказывает непосредственное воздействие на качество питьевой воды: взвесь, цветность, токсичность; а при значительном развитии биомассы вызывает заморы рыб, нарушение работы очистных сооружений, загрязнение побережий и пляжей. Показатели количественного развития фитопланктона широко используются при определении трофического статуса водоемов и для принятия решений по экологической реабилитации водоемов (Минеева, 2004). Вместе с тем, получение данных по состоянию фитопланктонного сообщества, а тем более актуальных данных – весьма трудоемкий и затратный процесс.

Современные спутниковые снимки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг на качественно ином уровне, дополняя и даже частично заменяя непосредственные полевые исследования. Таким образом, спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают полномасштабный и оперативный мониторинг состояния крупных водоемов, а также распределение фитопланктона по всей акватории (Кутузов, 2011; Valyuk et al., 2007). Теоретические основы подобных исследований, их методические решения активно разрабатывались начиная с 1980-х гг. XX в. (Буканова и др., 2011; Виноградов и др., 1996; Ерлов, 1980; Оптика океана, 1983; Физика океана, 1978).

Рассмотрим возможности применения ДЗЗ для изучения особенностей горизонтального распределения фитопланктона в некоторых озерах и водохранилищах Европейской территории России и Армении. Так, в соответствии с договорными работами по теме «Организация системы космического мониторинга планктонных водорослей на Ладожском озере и в восточной части Финского залива» с включением аналогичных работ на Псковском и Чудском озерах, проводились серии спутниковых (носители TERRA и AQUA с аппаратурой MODIS) и синхронных контактных

экспериментов в целях оперативной регистрации пространственного распределения планктона.

В процессе экспедиционных работ выполнялись регистрации параметров водной среды и отбор проб с использованием стандартных гидрологических и гидробиологических методов. В лабораторных условиях определялись массовые виды фитопланктона (доминантные группы), количество хлорофилла *a*.

Материалы спутниковой съемки низкого пространственного разрешения, полученные со спутников AQUA и TERRA (мультиспектральная аппаратура MODIS), обрабатывались на основе оценки отношения λ_1/λ_2 сигналов для длин волн $\lambda_1 \approx 440 \dots 490$ нм и $\lambda_2 \approx 520 \dots 560$ нм. Данные спектрорадиометра MODIS используются для оперативного мониторинга (до 4 раз в сутки), а данные спектрорадиометра OLI – для детального сопоставления с результатами подспутниковых измерений и как дополнительный источник данных. После проведения тематической обработки все полученные результаты, включая судовые измерения, экспортировались в единый ГИС проект «Планктон», в котором проходил дальнейший анализ совмещенных подспутниковых и спутниковых данных. Для Ладожского озера, при сопоставлении данных спутников AQUA/TERRA (MODIS) и LANDSAT-8 (OLI), получено принципиальное совпадение контуров «облаков» фитопланктона для обработанных данных ДЗЗ различного пространственного разрешения (1000м/пиксель – MODIS и 30м/пиксель – OLI) (рис. 3.16). Следует заметить, что при огрублении снимков LANDSAT-8 до 1000 м/пиксель степень совпадения этих контуров значительно возрастает. Соответствие измеренных величин концентрации хлорофилла *a* и полученных значений индекса цвета достаточно высоко с коэффициентом корреляции 0.88. На основе разработанной методики в качестве апробации были проведены аналогичные работы для Псковско-Чудской озерной системы. В результате получен аналогично высокий коэффициент корреляции между указанными ранее показателями.

Таким образом, на основе оценки зависимости между индексом цвета и концентрацией фитопланктона данные ДЗЗ можно использовать для оперативного контроля состояния водоема. В приведенных примерах интерпретации данных показано, что разработанный метод количественной оценки универсален для всех рассмотренных водоемов с различным гидрологическим режимом. Вместе с тем, новый уровень качества и более широкий спектр возможностей мониторинга скоплений фитопланктона может быть обеспечен при использовании платных многоспектральных снимков более высокой актуальности и высокого пространственного разрешения, полученных со спутников Европейского космического агентства (ESA) –

Sentinel-1A, 2A или аналогичных российских – корпорация «Роскосмос» («Ресурс-П», Ресурс-ДК1 и др.). На борту спутника «Sentinel-1» установлена радиолокационная станция (РЛС) с синтезированной апертурой/SAR, которая обеспечивает всепогодную спутниковую съемку в С-радиодиапазоне (длина волны 6 см). Однако способы распознавания зон концентрации фитопланктона в радиодиапазоне мало разработаны, так как определение идет в основном по косвенным признакам.

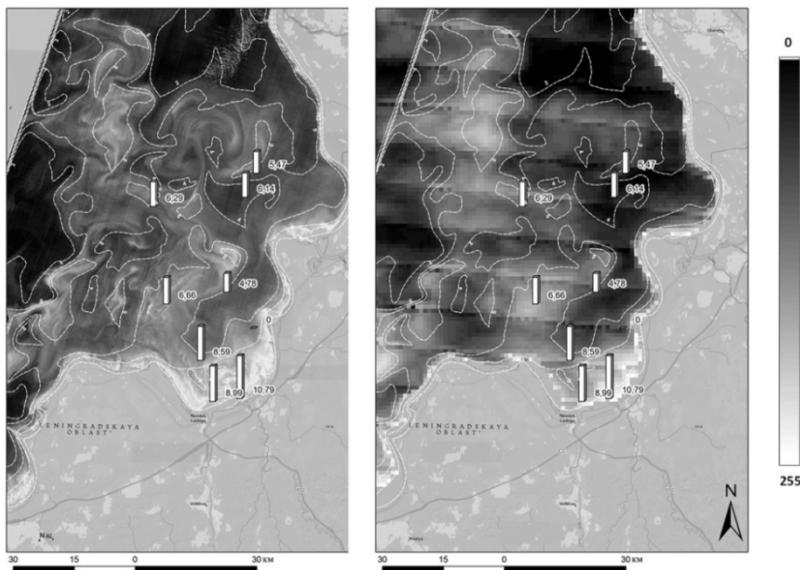


Рис. 3.16. Участок Ладожского озера, обследованный 4 августа 2013 г. (ГИС проект «Планктон»): слева – снимок спутника LANDSAT-8, справа – спутников AQUA / TERRA (подложка базовая топографическая карта).

Дальнейшие возможности применения данных ДЗЗ для изучения распределения фитопланктона в период массового «цветения» озера цианопрокариотами успешно показаны на примере высокогорного оз. Севан. Использовались космоснимки со спутника Sentinel-2. Предварительная обработка снимков заключалась в их атмосферной коррекции при помощи модуля SCP программы Quantum GIS. Далее при анализе снимков использовались каналы В3: 542.5–577.5 нм (разрешение 10 м), В5: 697.5–712.5 нм (разрешение 20 м), В7: 773.0–793.0 нм (разрешение 20 м), комбинация которых позволяет дать изображение, близкое к естественным цветам и четко отделить мелководья от прибрежной полосы. При этом вода выглядит от голубой до темно-синей, цианопрокариоты имеют цвет от изумрудного до ультрамаринового, в зависимости от стадии развития

(Sakharova et al., 2020). В результате исследований показано, что развитие цианопрокариот в оз. Севан имело горизонтальную и вертикальную неоднородность и было связано с глубиной, распределением течений, температурой, а также биомассой Cladocera (рис. 3.17).

Применительно к волжским водохранилищам исследования возможностей использования различных спутниковых сенсоров для решения задачи мониторинга цветения водорослей, были проведены на Рыбинском водохранилище совместно с контактными методами (Лаврова и др., 2014). Анализировались спутниковые данные, полученные сенсорами TM Landsat-5, ETM + Landsat-7, OLI Landsat-8, MERISEnvisat и ASAREnvisat. Радиолокационные изображения имели пространственное разрешение 150 м, а цветосинтезированные изображения MERIS – 260 м. В частности, показано, что на космоснимках цианобактерии проявляются в виде ярких нитевидных полос или целых скоплений, а их цвет зависит от стадии развития водорослей: от ярко-зеленых до буровато-коричневых (рис. 3.18).



Рис. 3.17. «Цветение» оз. Севан 11.07.2018 по данным дистанционного зондирования (Сахарова и др., 2020).



Рис. 3.18. Фрагмент наиболее интенсивного цветения цианобактерий в Рыбинском водохранилище, 12.08.2000 г., изображение ETM+ Landsat-7, 3–2–1 каналы (Лаврова и др., 2014).

В целом, при сопоставлении пространственно-временных и количественных данных по распределению фитопланктона, измеренных контактными и дистанционным способом, для корректного сравнения данных выяснилась необходимость учитывать следующие существенные моменты.

1. Космический снимок дает картину полей распределения фитопланктона действительную только на момент съемки, в это время отмечается максимальное совпадение данных подспутниковых измерений, производимых в течение дня.

2. Огрубление изображения аппаратурой может привести к пространственному смещению в пикселях зоны плотности «облака» фитопланктона, что может привести к расхождению с данными судовых измерений, проведенных на границе «фитопланктонного облака».

3. Следует отдельно учитывать и отдельно обрабатывать различные аномалии. Например, очевидные полосы инверсии – отражений: эффект «пилы» (от англ. saweffect) на изображении.

4. Данные снимка могут отличаться от полевых исследований, если время забора проб сильно отличается от времени снимка, пробы взяты близ границ «облака» фитопланктона и время дистанционных и контактных регистраций значительно отличается.

Нужно также учитывать, что данные снимка не точечные (как судовые замеры), а осреднены на определенную площадь. Наличие облачности более 10 % сильно ограничивает возможность использования полученных спутниковых изображений для определения планктонных водорослей по данным ДЗЗ. Вместе с тем показано, что в оперативном мониторинге возможно использование и таких снимков путем определения и последующей обработки маски облачности и выделения участков с малой плотностью облаков.

3.7. Методы определения степени зарастания озер и мелководий равнинных водохранилищ по данным дистанционного зондирования

3.7.1. Спутниковые носители

В настоящее время, несмотря на активное применение методов ДЗЗ при изучении природных объектов, их использование в комплексных исследованиях внутренних водоемов достаточно ограничено. Это связано в основном с недостаточной разработанностью подходов к использованию данных ДЗЗ для применения в исследованиях гидрологических и гидробиологических процессов в озерах и водохранилищах. В частности, для мелководных водоемов с обширными областями развития прибрежной растительности остро возникает необходимость разработки методик точного выделения береговой линии и границ зон распространения макрофитов (Бочаров, 2021). При этом точность выделения зарастающих участков мелководий будет зависеть от размеров водоема и разрешающей способности космоснимка. Для достаточно крупных водоемов (Псковское озеро

– площадь 708 км²), несмотря на размер пикселя снимка 30×30 м (спутники Landsat 5, 7 и 8), картина распространения высшей водной растительности (ВВР) в пределах всего озера представляет собой узкую вдольбереговую полосу (рис. 3.19) (Михайлова, Михалап, 2019).

Более детальное распределение ВВР удастся проследить на водоемах существенно меньших размеров. Так, при изучении зарастания акватории малого равнинного Омутнинского водохранилища с площадью 9.5 км², наряду с наземными исследованиями использовались снимки спутников Landsat-5 (с разрешением 30 м) и Sentinel-2A (с разрешением 10 м). Для дешифрирования выбирались снимки при малооблачной погоде в период вегетации большинства макрофитов (май–сентябрь) с последующим расчетом вегетационного индекса NDVI (см. п. 3.3.2). Площадь зарастания акватории ВВР определялась по рассчитанным значениям NDVI. Для обработки данных использовалась программа QGIS Desktop 3.14.1with GRASS 7.8.3. (Кутявина и др., 2020).



Рис. 3.19. Распределение гелофитов на Псковском озере в 2017 г. (Михайлова, Михалап, 2019).

сделан прогноз полного зарастания верховьев водохранилища к 2042 г. (рис. 3.20) (Zalata, Silkin, 2015).

Интенсивный процесс зарастания акваторий малых водохранилищ происходит в значительной степени под воздействием антропогенных факторов. В этом смысле характерно Воронежское водохранилище (площадь 70 км²), полностью расположенное на урбанизированной территории. В целях изучения эколого-геологического состояния водоема был осуществлен анализ разновременных космоснимков в период с 1975 по 2015 г. Дешифрирование ВВР в северной части водоема осуществлялось визуально по различным оттенкам зеленого цвета, соответствующего в комбинации каналов Landsat 5-4-3 ближайшему ИК диапазону. На основе полученных результатов был

Очевидно, что для водохранилищ многолетнего (Рыбинское, Куйбышевское, Цимлянское) и сезонного, недельного и суточного (Иваньковское, Угличское, Горьковское, Саратовское, Волгоградское) регулирования стока подходы к выделению береговой границы и участков распространения макрофитов будут различаться. Как уже отмечалось выше, более детальный крупномасштабный анализ распространения ВВР на больших водных объектах целесообразно проводить на типовых ограниченных территориях.

Применительно к Иваньковскому водохранилищу с постоянным уровнем воды в течение вегетационного периода выделение на космических снимках береговой линии проводится по значениям коэффициентов отражения: пиксели соответствующие водной поверхности имеют низкую отражательную способность, в то время как пиксели соответствующие суше характеризуются более высоким коэффициентом отражения. В процессе многолетних исследований А.В. Бочаровым (2021) было установлено, что участки развития воздушно-водной растительности, проявляются в превышении значений отражательной способности в ближнем ИК (b5 канал Landsat-8: 0.845–0.885 мкм) над красным (b4 канал Landsat-8: 0.630–0.680 мкм). Границу между зарослями ВВР и чистой водой предложено проводить по значениям коэффициента $k = b4/b5$, характеризующего наклон спектра в диапазоне 0.630–0.885 мкм. В случае если $k < 1$ – пиксель относится к воздушно-водной растительности, тогда как при $k > 1$ его следует относить к чистой водной поверхности (рис. 3.21).

Заращение мелководий водохранилищ многолетнего регулирования стока связано с изменениями уровня режима воды, морфологическими условиями формирования мелководий и процессами переформирования берегов. Детальные исследования зарастания отдельных типов мелководий с использованием наземных и дистанционных методов выполнялись на Цимлянском и Рыбинском водохранилищах. В процессе работ на Цимлянском водохранилище для предварительной оценки процессов зарастания мелководий ВВР отбирались общедоступные снимки с радиометров TM (Landsat 4-5) и OLI (Landsat 8) с пространственным разрешением 30 м в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне (Кочеткова и др., 2018). Для оценки зарастания был выбран синтез каналов 4–3–2 (TM) и 5–4–3 (OLI), где растительные сообщества представлены многообразием оттенков красного цвета. В результате были выделены фазы медленного постепенного зарастания (1987–1998 гг.) и быстрого импульсивного зарастания водоема (1998–2017 гг.) (рис. 3.22). В Рыбинском водохранилище исследовалось заостровное мелководье в Волжском плесе, морфометрия которого приведена в п. 3.5.

Для определения границ мелководья и крупномасштабного картографирования использовались данные спутников Landsat 5–8, Sentinel-2 с пространственным разрешением 10–15 м/пиксель; значения уровня воды на дату снимков за период 2009–2019 гг. и аэрофотоснимки мелководья, выполненные в 1989 г. Определение на снимках открытой воды и зарослей макрофитов основывалось на значениях индекса NDVI. При компьютерной обработке космоснимков диапазон полученных значений NDVI разбивался на три экспоненциально распределенных класса: открытая вода; разреженные заросли с общим проективным покрытием <50 %; плотные заросли с общим проективным покрытием >50 %. Для анализа сезонной динамики ВВР отбиралась серия безоблачных снимков за 2016 и 2019 гг., охватывающих наиболее полно вегетационный период. Обработка данных проводилась в стандартных пакетах модулей географических информационных систем QGIS 3иArcGIS 10.

В процессе анализа и обобщения накопленных данных, степень зарастания всего участка и обводненной части мелководья (протоки между островом и берегом) определялась как отношение площади зарастания к площади рассматриваемого мелководья в период максимального развития растительности при максимальном уровне (Распопов, 1985; Папченков, 2013). На основании анализа спутниковых снимков выявлено постепенное увеличение площади зарослей ВВР протоки от начала вегетационного периода до начала осени на 1 км² (рис. 3.23). В целом же к 2019 г. зарастание всего заостровного участка увеличилось до 73 % относительно НПУ (Поддубный и др., 2022).

3.7.2. Беспилотные летательные аппараты

При исследовании растительного покрова озер среднего и крупного размера детальное картирование водной и прибрежно-водной растительности – одна из самых трудоемких методик. В настоящее время для решения такой проблемы могут успешно использоваться малые беспилотные летательные аппараты – квадрокоптеры (БПЛА) (рис. 3.24). В 2018–2019 гг. при помощи малого БПЛА была проведена аэрофотосъемка растительного покрова оз. Плещеево – одного из наиболее изученных озер Ярославской области (Цветков и др., 2020). Непосредственно перед началом работ лито-раль озера была разделена на 6 участков (рис. 3.25).

Фотосъемки производились с малого БПЛА «DJI Phantom 4 Professional». Горизонтальная скорость БПЛА составляла 8–12 м/с, высота полета – 150–500 м, фотографирование осуществлялось автоматически с интервалом 2, 5 или 7 с фотокамерой, направленной вертикально вниз. БПЛА пилотировался в вдоль береговой линии по видеосигналу и данным

телеметрии. Общая протяженность маршрута в пределах литорали составила ~25 км. Взлет и приземление БПЛА проводился в ручном режиме.

В течение указанных лет выполнено 10 съемок с общим количеством снимков – 6673. Полученные серии изображений в достаточной степени перекрывали исследуемый район для последующего построения единого ортофотоплана местности. Снимки обрабатывались в программном обеспечении AgiSoftPhotoScan стандартными этапами, которые заключались в выравнивании полученных фотоснимков, поиске общих точек, построении облака точек, построении трехмерной модели местности, построении матрицы высот. После обработки материала для каждой съемки строился ортофотоплан, дальнейшая работа с которым проводилась в геоинформационной системе Quantum GIS (QGIS).

В результате исследований были сделаны важные выводы:

- на снимках хорошо просматриваются пятна и пояса растительных сообществ, которые в случае явного доминирования одного вида хорошо идентифицируются;
- затруднительно распознавание в случае полидоминантных и переходных ценозов обсыхающих прибрежных и мелководных зон;
- перспективным способом решения этой трудности представляется закладка трансект через такие участки.

В целом, к рекомендациям по изучению растительного покрова озер с помощью БПЛА следует отнести: 1) аэрофотосъемку необходимо проводить в пик развития водных растений в июле–августе; 2) для общей рекогносцировки проводить начальный облет на больших высотах (150–500 м); 3) трансекты закладывать через типичные участки, с выполнением геоботанических описаний и геопривязкой к опорным точкам (площадкам); 4) для точной идентификации растительных сообществ осуществлять облет по намеченным трансектам на малой высоте (до 50 м).

3.8. Идентификация горизонтальной циркуляции водных масс посредством данных дистанционного зондирования

Как уже отмечалось выше, применение дистанционных методов для изучения различных явлений на поверхности водоемов началось в связи с возможностью получения космических снимков поверхности Земли. Причем океаны и моря стали первыми объектами при исследовании их пространственно-временной термодинамической структуры посредством ДЗЗ (Монин, Красицкий, 1985). На протяжении всех последующих лет и в настоящее время дистанционные методы регистрации на морской поверхности таких явлений, как течений, волн и примесных

неоднородностей получили значительное распространение. Среди имеющихся исследований такого рода остановимся кратко на результатах некоторых значимых работ применительно к локальным участкам морей и крупных озер.

В целях поиска подходов к повышению информативности регистрации гидрофизических явлений на морской поверхности проведен анализ данных радиолокационных и оптических наблюдений в юго-восточной части Черного моря. В качестве приборов использовались радиолокационные системы берегового базирования, а также радиолокационные и оптические системы на спутниковых носителях Sentinel 1A, 1B, 2Aс СВЧ-радиолокатором и береговой доплеровский коротковолновый радиолокатор Sea Sonde. В результате исследований по спутниковым данным на морской поверхности в прибрежной акватории моря и в окрестности сильной изменчивости береговой линии выявлено формирование крупномасштабных вихревых структур (рис. 3.26). Перенос вихревых систем сопровождается увеличением их размеров и возникновением протяженных (десятки километров) струй, что характерно, в частности, для распространения волн Россби (Горбацкий и др., 2022).

Ладожское озеро относится к одному из наиболее изученных водных объектов, на котором проводились и проводятся в настоящее время комплексные исследования термодинамической структуры с использованием ДЗЗ, контактных и математических методов. Первые работы по использованию данных ДЗЗ относятся к осени 1979 г. Материалами исследований послужили данные телевизионной сканерной съемки среднего и высокого разрешения (МСУ-СК и МСУ-Э с разрешением на местности до 45 м в диапазонах 0.5–0.6, 0.6–0.7, 0.8–0.9 мкм) со спутников «Метеор-30» и «Космос-1939», а также результаты космической съемки, выполненной со спутника ЕРТС-1 многоспектральным сканером (Филатов, 1991). В процессе обработки спутниковой информации на снимках были выявлены вихревые неоднородности и внутренние волны в открытой и прибрежной зонах Ладожского озера. Индикаторами динамических неоднородностей служили взвесь (воды рек Волхов и Свирь) и планктон.

Для выявления природы обнаруженных явлений одновременно с ДЗЗ выполнялись контактные судовые измерения параметров водной среды (температуры воды, течений на отдельных вертикалях, колебаний уровня воды), наблюдения метеорологических параметров (скорости и направления ветра, давления, облачности), а также расчет циркуляции воды по диагностической модели (рис. 3.28).

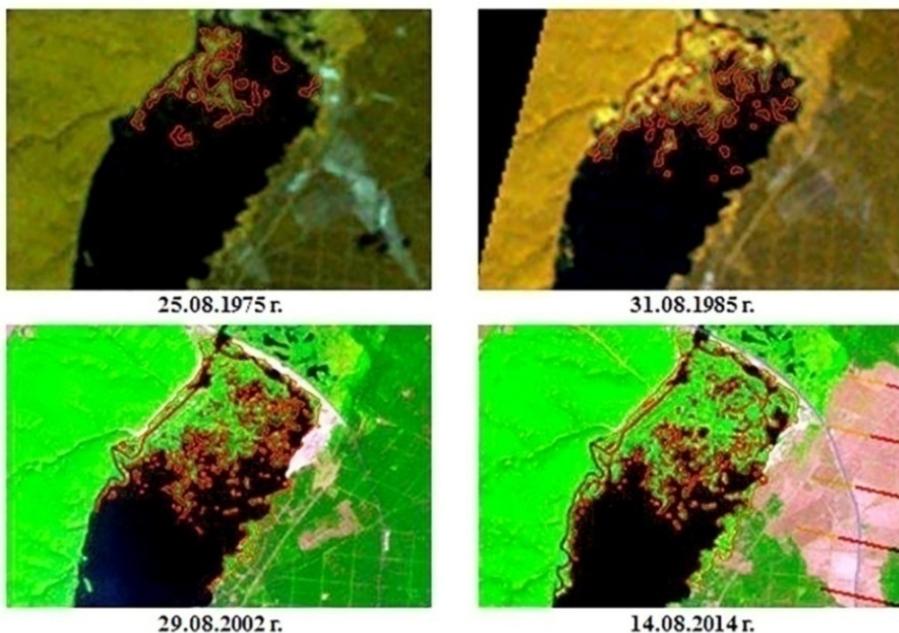


Рис. 3.20. Тенденция распространения жесткой растительности в верховьях Воронежского водохранилища по данным ДЗЗ (Zalata, Silkin, 2015).



Рис. 3.21. Пример выделения областей распространения воздушно-водной растительности по снимку сенсора OLI спутника Landsat-8 (4 июля 2015 года, район пос. Старое Мелково): 1 – чистая водная поверхность, 2 – участки развития воздушно-водной растительности (Бочаров, 2021).

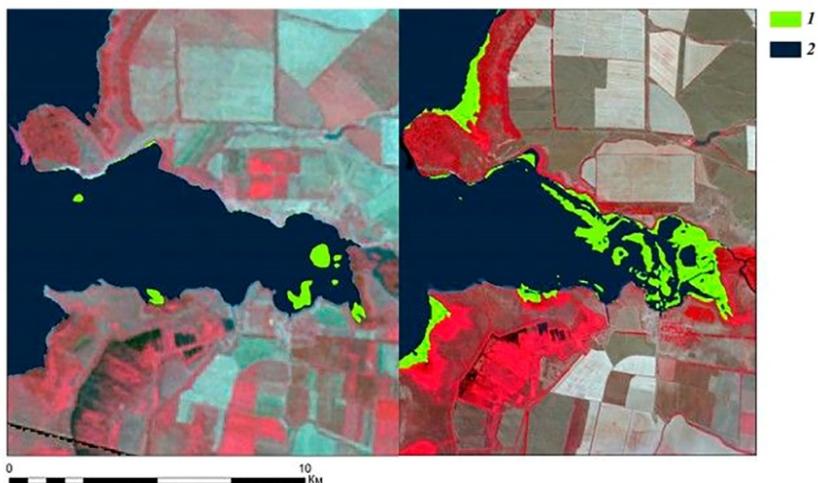


Рис. 3.22. Участки зарастания (1) крупных заливов на месте устьевых областей рек (2) на Цимлянском водохранилище с 1987 по 2017 гг. (Ромашкинский залив) (Кочеткова и др., 2018).

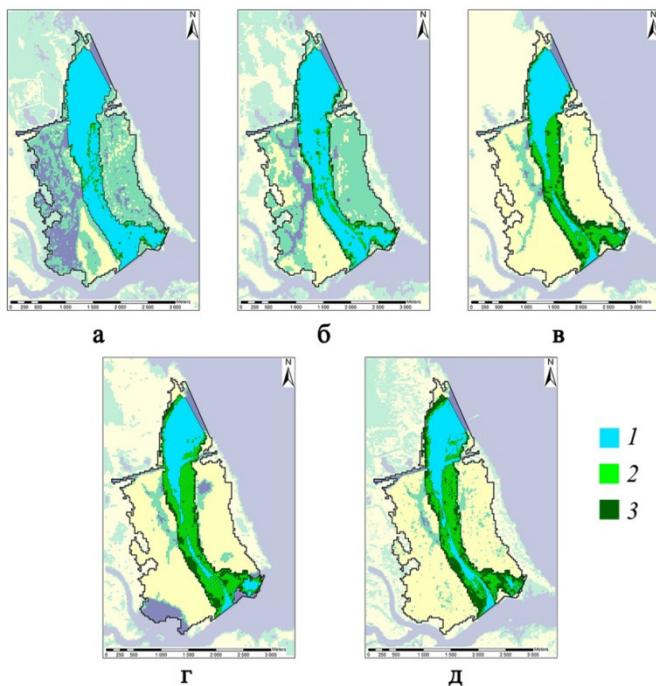


Рис. 3.23. Сезонная динамика зарастания защищенного мелководья в 2016 г.: а – 02.05, б – 29.06, в – 24.07, г – 01.09, д – 09.10. 1 – вода, 2 – редкие заросли, 3 – плотные заросли. Масштаб 500 м.



Рис. 3.24. БПЛА – квадрокоптер DJI Phantom 4 Professional.

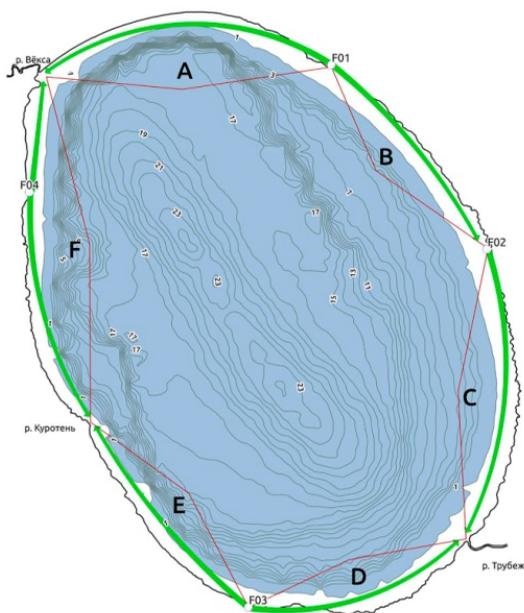


Рис. 3.25. Карта-схема деления литорали оз. Плещеево на участки и маршрут проведения аэрофотосъемки. Латинскими буквами обозначены участки литорали. Зеленые стрелки – маршрут полета БПЛА (Цветков и др., 2020).

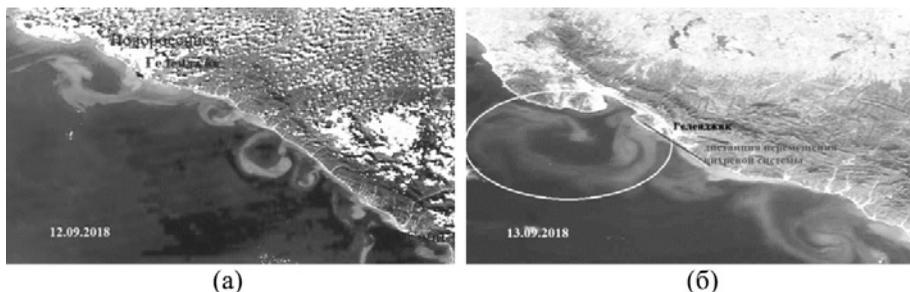


Рис. 3.26. Картины перемещения вихревой структуры в период с 12 (а) по 13 сентября (б) 2018 г. (Горбацкий и др., 2022).

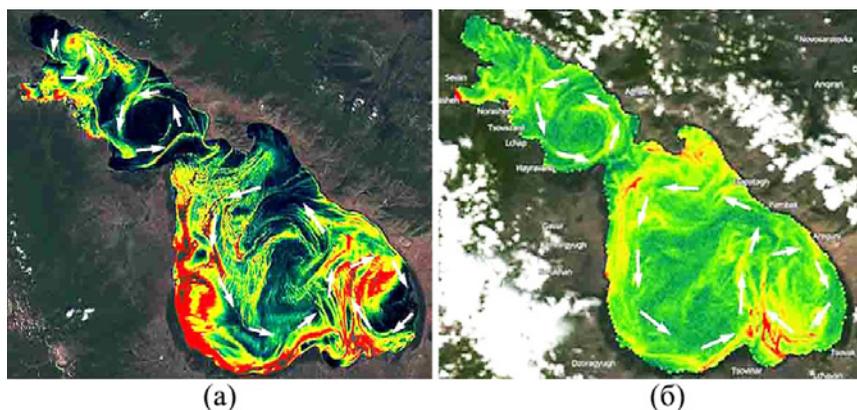


Рис. 3.27. Распределение хлорофилла 11.07.2018 г. (а) и 15.07.2020 г. (б) в оз. Севан по данным дистанционного зондирования. Стрелками показан преобладающий перенос воды.

Другим направлением в оценке системы течений водоема и, в частности, поверхностных течений, является расчетный метод максимальной кросс-корреляции (Maximum Cross Correlation, далее МСС), использующий последовательные ИК спутниковые снимки с интервалом в несколько часов (Гузиватый и др., 2020). Метод разработан для обнаружения поверхностных потоков, связанных с видимыми движениями температурных градиентов. Применительно к Ладожскому озеру метод МСС дает реалистичные результаты, адекватно отражающие динамику поверхностного слоя воды. В то же время, существенным ограничением метода МСС выступает отсутствие ярко выраженных горизонтальных градиентов температуры на поверхности водоема – при градиенте менее 0.3°C на 50 км оценка течений методом МСС не представляется возможным.

Известно, что экологическое состояние озер может быть оценено с использованием таких показателей, как концентрация хлорофилла *a*, содержа-

ние взвешенного материала, коэффициента абсорбции растворенного органического вещества и прозрачности воды (Soomets et al., 2020). Причем водоросли, а именно, содержание в них хлорофилла *a* хорошо идентифицируемое по космическим снимкам достаточно явно выступают индикаторами гидродинамических процессов (вихрей, зон конвергенций в циркуляциях Лэнгмюра и фронтальных зонах), пассивно перемещаясь под действием течений (Монин, Красицкий, 1985).

Для выявления особенностей горизонтальной циркуляции вод оз. Севан использовались космические снимки с последующим анализом распределения мутности или хлорофилла в зависимости от конкретного состояния водной массы озера¹. Корреляционные зависимости между мутностью, хлорофиллом *a* и каналами сенсора Landsat-8, Sentinel 2A выбирался согласно методике, предложенной О.А. Тихомировым и др. (2016 а, б) для водоемов средней полосы Европейской части России. При обильном цветении использовалась методика расчета хлорофилла, а при отсутствии или слабом цветении – определение мутности.

На оз. Севан горизонтальное распределение хлорофилла *a* определяется гидродинамическими структурами, характерными для крупных озер Европейской части России (Ладожского и Онежского) (Филатов, 1991), Великих озер (Shuchman et al., 2014). В результате расчетов геострофической циркуляции динамическим методом и анализа космических снимков идентифицирована система циркуляционных образований в озере: циклонический круговорот в южной части Малого Севана, обширный циклонический круговорот в Большом Севане, локальный антициклонический круговорот воды в юго-восточной части Большого Севана (рис. 3.27).

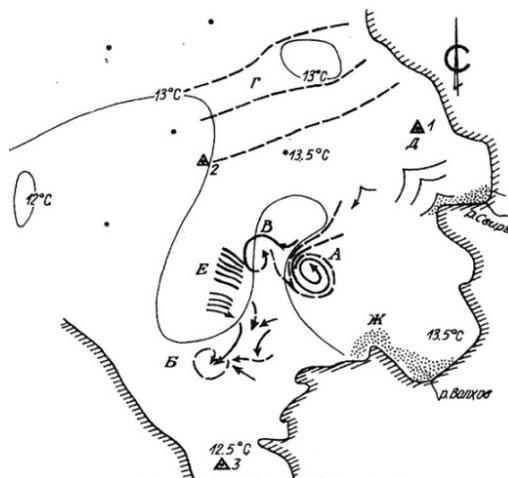


Рис. 3.28. Элементы динамики вод Ладожского озера по результатам дешифрирования космического снимка. Буквами (А–Ж) обозначены вихри, внутренние волны; 1–3 – точки измерения гидрофизических параметров; изолинии – температура поверхности воды, °С (Филатов, 1991).

¹ <https://eos.com/landviewer/>, раздел Earth Viewer, режим комбинации пользовательских каналов.

Глава 4. Моделирование гидрологических процессов

4.1. Геометрические модели акваторий водохранилищ

Геометрические модели ложа водоема или отдельных его частей позволяют выявить общие закономерности протекания в их пределах таких гидрологических процессов, как осушение и обводнение мелководий, водный баланс и водообмен, термические характеристики. Впервые возможность использования геометрических тел вращения с вертикальной осью и основанием, имитирующим водную поверхность, для аппроксимации озерной чаши была показана С.Д. Муравейским (1960). Модели морфологически простых озерных чаш представляли собой цилиндр, полуэллипсоид, параболоид, конус. В конце 1950-х – середине 1960-х гг. была составлена математическая типология озерных бассейнов, охватывающая все виды геометрических форм, включая экстремальные эллиптические синусоиды, определяющие усредненную форму озера (Страшкраба, Гнаук, 1989).

4.1.1. Модель ложа долинного водохранилища

Долинные водохранилища по своей форме существенно отличаются от большинства озерных чаш: удлиненностью очертаний в плане, асимметрией продольного профиля, морфологическим подобием отдельных отрезков речной долины. В результате проведенных исследований за геометрическую модель надпойменной емкости простого пойменно-долинного водохранилища была принята усеченная трапецеидальная призма (Даценко, Эдельштейн, 2001; Страшкраба, Гнаук, 1989; Эдельштейн, 2015). Модель представляет собой в продольном разрезе прямоугольный треугольник с горизонтальной верхней гранью в виде трапеции, соответствующей водной поверхности при НПУ длиной L . Боковая грань – створ гидроузла высотой H , равной глубине у плотины, основание B_0 – ширина приплотинного плеса, основание b – средняя ширина поймы в затопленном речном участке. В данной модели площадь поверхности F_0 (наибольшая грань призмы) и объем призмы при НПУ W_0 рассчитываются по уравнениям:

$$F_0 = L(B_0 + b)/2 \text{ и } W_0 = LH(B_0 + 2b)/6 \text{ (рис. 4.1).}$$

4.1.2. Модель устьевой области малой реки

Устьевая область реки (УОР) – это ключевая зона взаимодействия речных вод и водной массы водохранилища. Основными гидрофизиче-

скими процессами здесь являются: формирование фронтальной зоны раздела речных и озерных вод со свойственными им значениями температуры и электропроводности воды и гидрохимическими показателями, а также специфическая структура поля течений, характерная для открытых частей водохранилища. Ведущим антропогенным гидрологическим фактором выступает сезонный ход уровня воды, который определяет пространственно-временную динамику гидрофизических и гидрохимических показателей в пределах устьевой области реки.

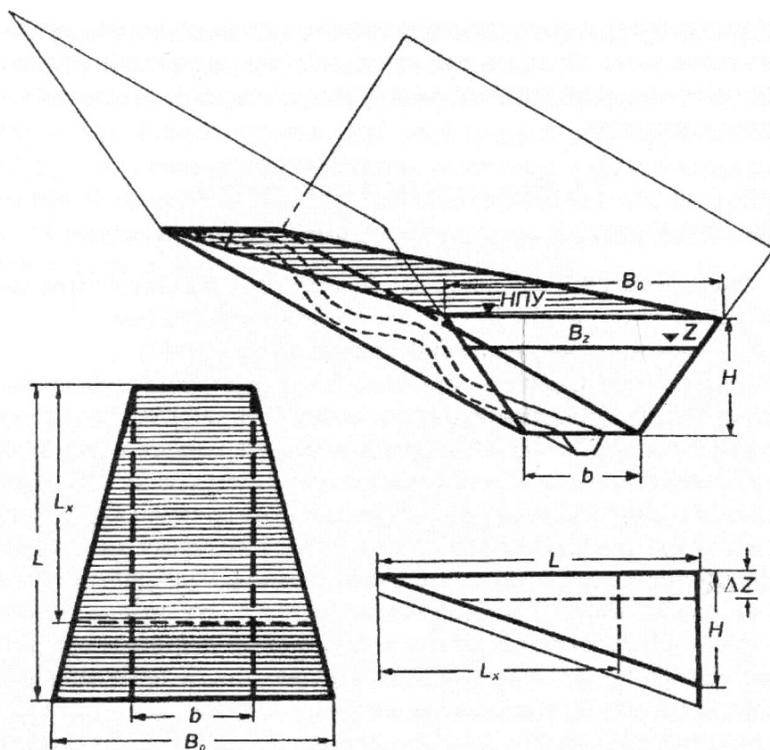


Рис. 4.1. Усеченная трапецидальная призма – модель морфологически простого пойменно-долинного водохранилища: общий вид фигуры, ее трапецидальная грань, имитирующая водную поверхность (заштрихована) и треугольное продольное сечение (обозначения параметров модели приведены в тексте) (Даценко, Эдельштейн, 2001).

Основное гидробиологическое явление – формирование во фронтальной (градиентной) зоне экотона – специфического участка с максимальным разнообразием и обилием сообществ зоопланктона. Распределение плотности рыб определяется абиотическими характеристиками среды, от которых

зависит и развитие беспозвоночных. Плотность рыб коррелирует с температурой воды, БПК₅, а также численностью и биомассой зоопланктона. Отмечена четкая тенденция увеличения величин плотности рыб во фронтальной зоне с весны до второй половины лета (Крылов и др., 2010).

Результаты комплексных биогидрологических исследований позволяют сформулировать определение устьевой области малой реки (притока водохранилища) как сложной составной части аквально-территориального речного комплекса, образованной в результате антропогенного воздействия (затопления долины реки водами водохранилища), не имеющей дельты, но формирующейся под воздействием устьевых процессов: динамического взаимодействия и смешения вод реки и водохранилища на фоне сезонных колебаний уровня воды приемного водоема, отложения и перетотложения речных наносов и частично наносов водохранилища, отличающейся специфическим гидробиологическим режимом, сочетающим в себе особенности речных и озерных экосистем (Поддубный, 2014).

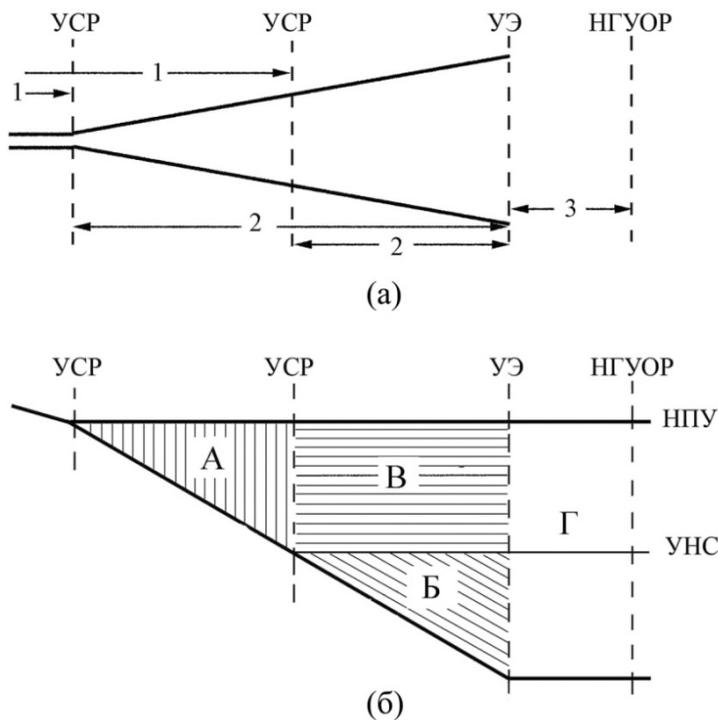


Рис. 4.2. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) зонирование эстуария малой реки-притока водохранилища. 1 – устьевой участок реки, 2 – эстуарий, 3 – устьевая зона водохранилища, НГУОР – нижняя граница устьевой области реки. Остальные обозначения даны в тексте.

Устьевая область реки может состоять из четырех основных частей: устьевого участка, дельты, эстуария и устьевой зоны приемного водоема (Михайлов, Горин, 2012). Применительно к эстуарию выделяются следующие основные части: устьевой участок реки, эстуарий реки и устьевая зона приемного водоема. Границами участков соответственно выступают устьевой створ реки или вершина эстуария (УСР) и устье эстуария (УЭ).

В эстуариях малых рек-притоков водохранилищ основное влияние на гидрологический и гидробиологический режимы оказывают сезонные изменения уровня воды, определяемые режимом сработки и наполнения водохранилищ. В связи с этим, при очевидной сопоставимости схем горизонтального зонирования эстуариев рек, впадающих как в моря, так и в водохранилища, вертикальное районирование эстуария может отличаться. Так, в устьевой области малой реки-притока водохранилища целесообразно выделять: А – зону переменного подпора (переменного устьевого створа), периодического осушения, переменного объема; Б – зону постоянного подпора (постоянного объема); В – зону переменного объема, Г – устьевую зону водохранилища (рис. 4.2).

Исходя из V-образного поперечного профиля УОР, в качестве фигуры подходящей для аппроксимации эстуария реки может быть выбрана прямоугольная пирамида с равнобедренным треугольником в основании, соответствующим сечению устья эстуария (рис. 4.3). Общий объем фигуры эстуария при нормальном подпорном уровне (НПУ) равен: $W = BHL/6$; объем фигуры, соответствующий зоне постоянного подпора – $W_1 = BL(H_1)^3/6H^2$ (горизонтальная штриховка на рис. 4.2а); объем слоя внутри пирамиды-эстуария (вертикальная штриховка на рис. 4.2б) – $\Delta W = BL[(H_2)^3 - (H_1)^3]/6H^2$, где L и L_1 – длина зоны подпора (м), B и B_1 – ширина устья эстуария (м), H и H_1 – глубина в УЭ (м) при НПУ и уровне нормальный предполоводной сработки (УНС) соответственно, L_2 – длина зоны подпора слоя воды, H_2 – глубина верхней границы слоя в УЭ. Площадь поверхности эстуария при НПУ равна $S = LB/2$, а при достижении УНС – $S = LB(H_1)^2/2H^2$. Значения H и B снимаются с навигационной карты, длина подпора (L) при аппроксимации ее прямой линией вычисляется по формуле $L = H/I$, где I – уклон русла (Поддубный, 2015).

Использование геометрической модели позволяет выявить особенности водного баланса, водообмена и течений устьевых областей малых рек эстуарного типа, а также оценить их термические характеристики в сезонном и многолетнем плане (Поддубный, 2019).

4.1.3. Модели защищенных мелководий

Основные виды литорали, определяющие абиотическую и биотическую структуру прибрежных экосистем – это открытые и защищенные мелководья. Причем последние приобретают наибольшее значение в формировании биопродуктивности литорали, где наиболее активно происходят процессы самоочищения воды, интенсивно развиваются водные и прибрежно-водные растения, концентрируются места нереста фитофильных рыб и нагуливания молоди (Поддубный и др., 2017).

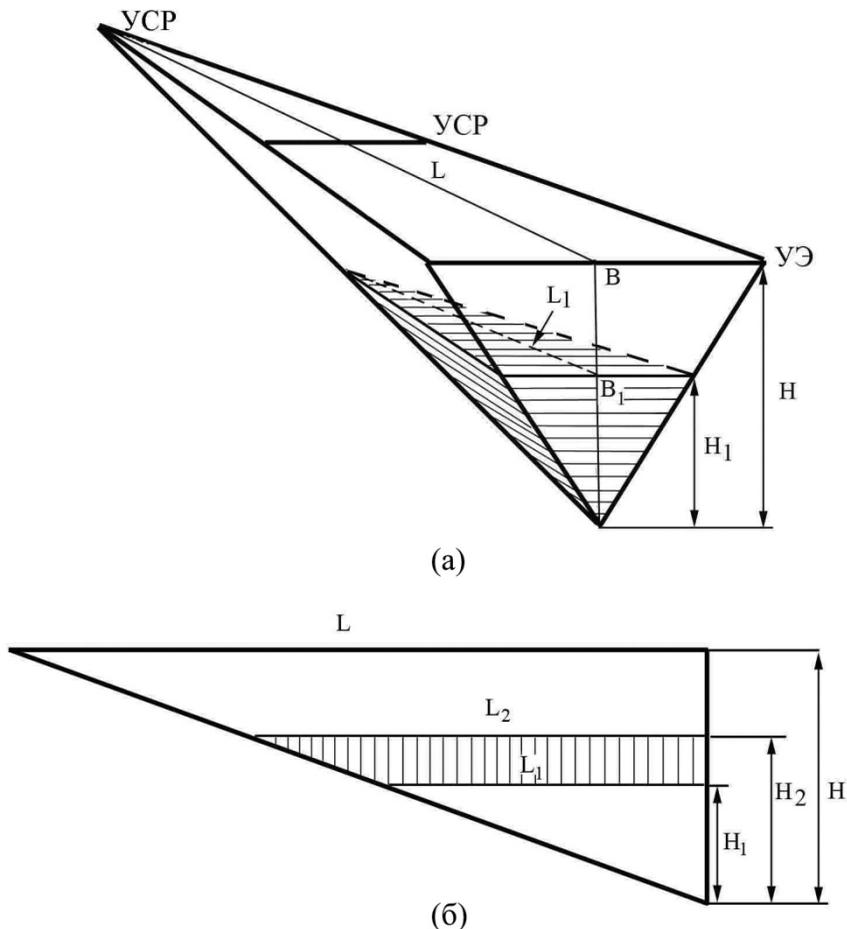


Рис. 4.3. Геометрическая модель эстуария малой реки: а – объемный вид, б – продольное сечение.

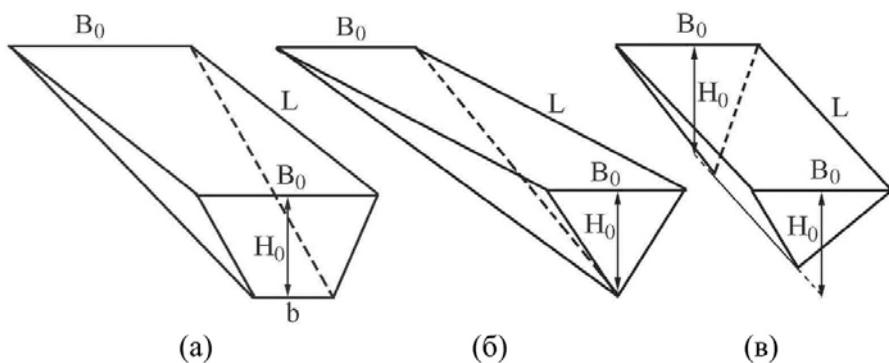


Рис. 4.4. Геометрические фигуры, аппроксимирующие ложе мелководий: а – залив, б – мелководий карманного типа, в – заостровных пространств.

Среди защищенных мелководий, относящихся к верхневолжским водохранилищам, могут быть выделены *заливы*, *заостровные пространства*, мелководья, отделенные от открытой литорали сплошными или прерывистыми косами – *карманные*. Как правило, защищенные мелководья представляют собой комплекс отдельных типов мелководий (моноструктур) и по своей структуре могут быть отнесены к полиструктурным. Применение геометрических моделей к указанным типам мелководий может создать основу для изучения их водного баланса, водообмена и термического режима с учетом сезонных и многолетних изменений гидрологических характеристик водохранилищ.

На начальном этапе исследований для аппроксимации морфометрии мелководий отобрано 16 геометрических фигур, из которых в дальнейшем по результатам верификации с использованием программы «SAS. Планета» для заливов выбрана усеченная трапециевидная призма, для карманных мелководий – усеченная треугольная призма, для заостровных пространств – клин (рис. 4.4). При этом средние относительные ошибки для всех водохранилищ по F составили 0.1 %, по W – 7.3 %. Формулы $F = f(H)$ и $W = f(H)$ (батиграфические кривые) для каждой из трех отобранных геометрических фигур приведены в табл. 4.1.

4.2. Расчет температуры воды

Температура воды – одна из важнейших характеристик водоема, предопределяющая активность протекающих в нем биологических и химических процессов. В глубоких озерах температура воды как физическая характеристика в большинстве случаев полностью определяет распределение воды по плотности и соответственно вертикальную устойчивость

водных масс, способствует формированию различного рода циркуляционных течений и влияет на дрейфовые течения (Петров, Бояринов, 1991). Большое общелимнологическое значение имеет и изучение особенностей температурного режима водохранилищ. Мелководность этих искусственно созданных водоемов ограничивает продолжительное существование вертикальной термической неоднородности водной массы. Формирование термоклина возможно в центральных плесах водохранилищ в случае относительно безветренной погоды и интенсивного прогрева верхних слоев воды. Сильное ветровое воздействие способствует быстрому перемешиванию водной толщи и выравниванию температуры по вертикали. Особое значение в структуре абиотических полей экосистемы водохранилищ приобретает динамика температуры воды в мелководной зоне. В целом температура воды является важным лимитирующим фактором жизни в водоемах, так как многие виды водных животных обладают узким диапазоном приспособляемости к температуре воды, и на определенных этапах жизни даже умеренные изменения ее могут повлечь гибель их или ухудшение условий существования (Буторин и др., 1982).

Таблица 4.1. Формулы зависимостей $F = f(H)$ и $W = f(H)$ для разнотипных защищенных мелководий

Показатель	Общий вид	Локальный вид
Заливы (усеченная трапециевидная призма)		
Площадь Объем	$S_z = \frac{L}{H^2} (H-z)[B_0(H-z) + bz]$	$S_z = \frac{1}{5} \frac{B_0}{H^2} L(H-z)(5H-3z)$
	$W_z = \frac{1}{6} \frac{L}{H^2} (H-z)^2 [2B_0(H-z) + b(H+2z)]$	$W_z = \frac{1}{5} \frac{LB_0}{H^2} (H-z)^2 (2H-z)$
Карманные мелководья (усеченная треугольная призма)		
Площадь Объем	$S = LB_0$	$S_z = \frac{B_0}{H^2} L(H-z)^2$
	$W = \frac{1}{3} B_0 HL$	$W_z = \frac{1}{3H^2} LB_0 (H-z)^3$
Заостровные мелководья (клин)		
Площадь Объем	$S_z = \frac{B_0}{H^2} (H-z)[L(H-z) + L_1 z]$	$S_z = \frac{B_0 L}{5H^2} (H-z)(5H-z)$
	$W_z = \frac{B_0}{6H^2} (H-z)^2 [2L(H-z) + L_1(H+2z)]$	$W_z = \frac{B_0 L}{15H^2} (H-z)^2 (7H-z)$

Примечание. Локальный вид формул для заливов и заостровных мелководий получен исходя из допущений $b = 0.4B_0$ и $L_1 = 0.8L$.

Методы контактного и дистанционного изучения распределения температурных полей нами были рассмотрены в предыдущих главах. Наряду

с традиционными методами успешно развиваются и методы математического моделирования температурного режима водоемов с использованием различных подходов. В классической постановке задача учитывает взаимное влияние температурного и скоростного режимов и предопределяет необходимость совместного рассмотрения уравнений движения жидкости и распространения тепла. Упрощение такой задачи возможно путем введения ряда допущений, к числу которых относятся: гипотеза о локальности процессов энерго-массообмена на границе раздела вода–воздух, допущение о пренебрежимо малом влиянии адвекции тепла течениями и наличии полного горизонтального перемешивания (Кучай, Скляренко, 1993).

Расчет вертикального распределения температуры воды выполнен на примере Главного плеса Рыбинского водохранилища с использованием идеи параметризации (Кучай и др., 2015). Предполагается, что в поверхностном квазиоднородном перемешанном слое (h) температура воды постоянна по глубине и равна температуре на поверхности (T_s °C). Распределение температуры в нижележащем слое описывается с помощью двух безразмерных переменных $\theta = (T_s - T_z)/(T_s - T_H)$ и $\eta = (Z - h)/(H - h)$, где H – глубина, начиная с которой $\frac{\partial T}{\partial Z} = 0$, T_H – температура воды на этой глубине. Следовательно, распределение температуры по вертикали может быть представлено следующим образом:

$$T_z = T_s \text{ при } 0 \leq Z \leq h, T_z = T_s - (T_s - T_H) \cdot \theta(\eta) \text{ при } h \leq Z \leq H,$$

где $\theta(\eta)$ – безразмерная функция, удовлетворяющая условиям $\theta(0) = 0$ $\theta(1) = 1$, для которой С.А. Китайгородским (1970) предложена формула $\theta(\eta) = a\eta + b\eta^2 + c\eta^4$ с постоянными коэффициентами a , b , c , не являющимися универсальными. Для определения зависимости $\theta(\eta)$ были использованы температурные профили, полученные на пяти станциях Главного плеса водохранилища. Анализ данных наблюдений вертикального распределения температуры в толще воды Центрального и Волжского плесов показал, что вне зависимости от формирующейся по-разному толщины поверхностного слоя распределение температура воды в нижележащем слое характеризуется плавным ее падением с глубиной и может быть аппроксимировано функцией Линдена (1975):

$\theta(\eta) = 2.0\eta - 1.2\eta^2 + 0.2\eta^4$. Осенью, когда падение температуры проходит резче, может быть использована формула С.А. Китайгородского $\theta(\eta) = 3.26\eta - 2.89\eta^2 + 0.63\eta^4$ (рис. 4.5, 4.6). Следует отметить, что применительно к другим водоемам при значительном количестве информации о распределении температуры в нижележащем слое осреднение данных может привести к аппроксимации функцией с иными коэффициентами или другой функцией.

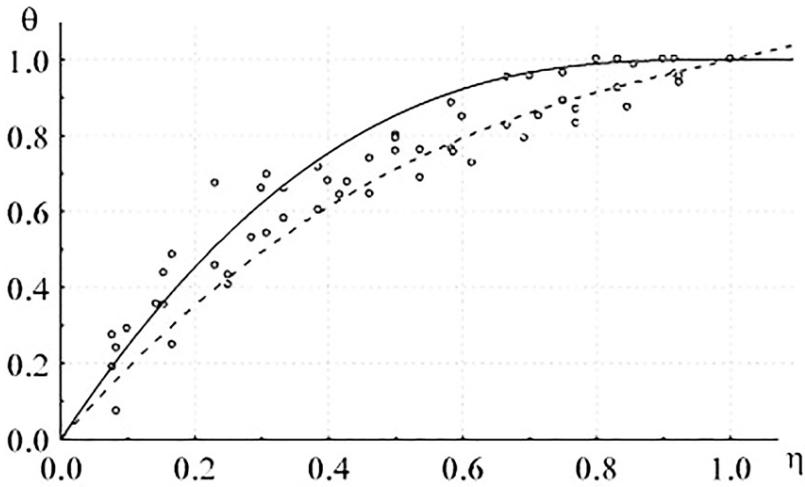


Рис. 4.5. Профили $\theta(\eta) = a\eta + b\eta^2 + c\eta^4$: гладкая линия – функция, предложенная Китайгородским (1970), точечная – функция Линдена (1975). Точками представлены данные измерений.

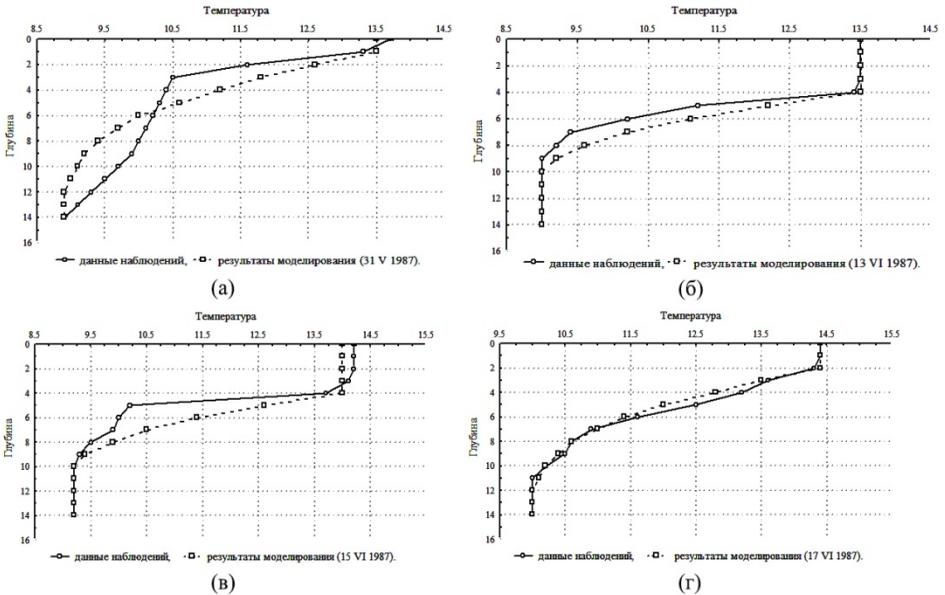


Рис. 4.6. Результаты моделирования распределения температуры по глубине в Главном плесе (идентификация).

Важной составной частью модели является определение толщины поверхностного квазиоднородного слоя воды. Для мелководного Рыбинского водохранилища допустимо предположение, что изменения динамического состояния его вод связано в основном с ветровой деятельностью над поверхностью водоема, и может быть охарактеризовано толщиной поверхностного перемешанного квазиоднородного слоя воды (h , м).

Исследования, связанные с изменением коэффициента вертикального турбулентного обмена с глубиной, показали, что для участков водохранилища, глубина которых достигает 12–14 м, толщина перемешанного поверхностного слоя составляет в среднем половину длины ветровой волны. Для расчета параметров ветровых волн использовались формулы Н.А. Лабзовского (1976) (п. 4.4.3). Использование срочных

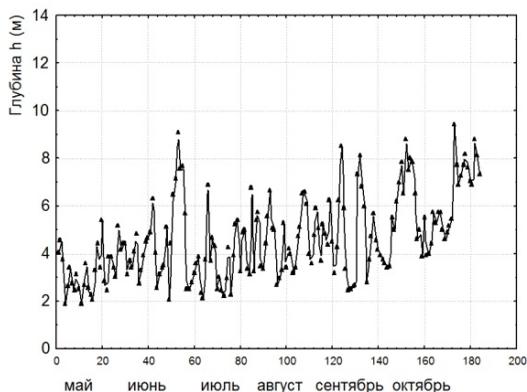


Рис. 4.7. Динамика поверхностного перемешанного слоя (Центральный плес, ст. Брейтово, 1983 г.).

данных по скорости ветра над акваторией водохранилища позволило рассчитать параметры ветровых волн в разных частях Главного плеса водоема и получить среднюю по плесу величину толщины верхнего перемешанного слоя. Было выявлено, что сильные ветры (6–9 м/с в безледный период) способствовали достаточно интенсивному перемешиванию с толщиной поверхностного квазиоднородного слоя 7–9.5 м. В это время наблюдалась стратификация без устойчивого термоклина. Напротив, слабая ветровая деятельность над поверхностью водоема (2.5–4 м/с) приводила к образованию поверхностного перемешанного слоя воды толщиной в среднем около 2–4 м (рис. 4.7).

4.3. Моделирование динамики вод в стационарных условиях

Горизонтальная циркуляция вод в водоемах формируется в результате совместного действия четырех главных факторов: ветра, притока в водоем и стока из него, рельефа дна и бароклинных эффектов. Характер такой циркуляции сложный и зависит от степени вклада каждого отдельного фактора. В мелководных водоемах, в том числе и в водохранилищах, циркуляция воды определяется первыми тремя факторами.

Бароклинные эффекты проявляются локально в кратковременные периоды интенсивного прогрева водоема. В речных плесах водохранилищ гидродинамический режим формируется в результате взаимодействия сброса верхних и нижних гидроузлов и стока притоков. В случае ветрового воздействия, противоположного направлению стокового течения, в зависимости о скорости ветра максимум скорости течения заглубляется и наблюдается в верхних и средних слоях. При слабых расходах и сильном ветровом воздействии часть русловой зоны может быть охвачена компенсационным ветровым течением. В малых и крупных озерах при наличии сезонного термоклина и устойчивого расслоения водной толщи на эпи-, мета- и гипolimнион бароклинные (плотностные) эффекты могут играть ведущую роль в формировании структуры течений.

4.3.1. Динамический метод расчета течений

Динамический метод расчета плотностных течений пресных водоемов позволяет рассчитать по измеренным полям температуры и электропроводности геострофическую циркуляцию воды в глубоких стратифицированных озерах и сравнительно неглубоких водохранилищах. Динамический метод успешно использовался для расчета течений в озерах Байкал, Иссык-Куль, Ладожском, Онежском, Севан (Филатов, 1983; Филатов и др., 1986). Применительно к малым озерам на основе динамического метода оценивалась плотностная циркуляция воды в оз. Плещеево (Поддубный и др., 2020). Указанный метод расчета плотностных течений применялся и для составления схемы циркуляционных течений в пределах малых водохранилищ Белоруссии (Широков и др., 1992). Оценочные расчеты плотностной циркуляции вод выполнялись для Рыбинского водохранилища в периоды максимальных горизонтальных градиентов температуры и электропроводности воды, зафиксированные в начале лета 1960–1963 гг.

Схема расчета течений динамическим методом включает несколько этапов (Зубов, Мамаев, 1956).

1. Выбор основной станции с глубиной, равной средней для всех глубин остальных станций: $H_0 = (H_1 + H_2 + \dots + H_n)/n$.

2. Расчет плотности по уравнению состояния пресной воды с учетом ее температуры и электропроводности, кг/м³ (Эдельштейн, 2014):

$$\rho = 999.975 + 10^{-3}(2 + 0.79\kappa_{18} + 2 \times 10^4\kappa_{18}^2) - [(T - 3.98)^2(T + 283)] / [503.57(T + 67.26)],$$

где T – температура воды, κ_{18} – удельная электропроводность воды, приведенная к 18°C.

3. Вычисление динамических высот основной и остальных станций:

- вычисление условного удельного объема $V_t = \left(\frac{1}{\rho} - 0.999\right) \times 10^3$,
- вычисление условного удельного объема V_{tp} с учетом поправки на глубину Z (табл. 3 приложения в кн. Зубов, Мамаев, 1956),
- вычисление среднего условного удельного объема между горизонтами, умноженного на расстояние между ними (м) $D' = \Delta Z V_{tp}$,
- вычисление условной динамической глубины, считая от нулевого горизонта, последовательным суммированием вниз по горизонтам D' ,
- вычисление условной динамической высоты d' , считая от последнего горизонта, последовательным суммированием вверх до первого горизонта D' .

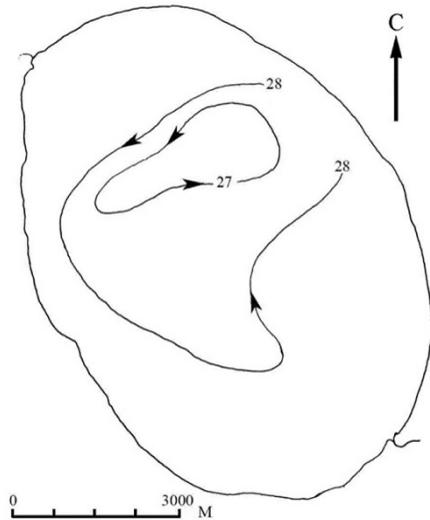


Рис. 4.8. Динамическая топография поверхности (мм) оз. Плесеево. Стрелками указано направление переноса воды.

4. Приведение динамических высот n -ой ($V_{tp2...n}$) станции к основной станции (V_{tp1}) осуществляется по формуле $\Delta = \frac{V_{1tp} + V_{2tp}}{2} (H_1 - H_2) \cdot V_{tp1}$ и $V_{tp2...n}$ берутся на самом нижнем горизонте станций.

5. Построение динамических карт для отдельных горизонтов по значениям D .

6. Вычисление скорости течения по разности динамических высот между станциями (см/с): $C = \frac{3.7}{L \sin \varphi} \Delta d'$. L – расстояние между станциями в милях.

Пример расчета динамических высот и скоростей течения приведен в таблицах 4.2 и 4.3, схема плотностных течений – на рис. 4.8.

4.3.2. Стационарная модель общей циркуляции водных масс

В глубоководной зоне озеровидных и частично речных плесов водохранилищ наблюдается достаточно широкий спектр динамических процессов, характерных для разнотипных озер и даже морей. Преобладание на большей части акватории водоемов ветровых течений позволяет ис-

пользовать для изучения структуры циркуляции водных масс стационарную модель ветровых течений (полных потоков), разработанную А.И. Фельзенбаумом (1960) для мелких морей и впоследствии адаптированную Государственным океанографическим институтом для озер и водохранилищ (1979). Модель позволяет учесть основные формирующие течения факторы: напряжение ветра на водную поверхность, приток в водоем и сток из него (что особенно важно для водохранилищ) и реальный рельеф дна. Кроме того, модель отличается простой конечно-разностной схемой решения задачи, достаточной гибкостью при описании структуры течений с учетом меняющихся граничных условий.

Первые попытки применения указанной стационарной модели относятся к началу 1970-х гг. Модельным объектом было выбрано Белое озеро, где на основе удовлетворительных результатов сравнения измеренных и расчетных течений сделан вывод о возможности использования модели для изучения особенностей макроциркуляций в больших мелководных водоемах (Литвинов, 1972). В дальнейшем А.С. Литвиновым и И.Ф. Фомичевым (1978) на примере Рыбинского водохранилища оценивалась роль отдельных факторов в формировании горизонтальной циркуляции водных масс. В результате серии расчетов при различных гидрометеорологических характеристиках выявилась определяющая роль рельефа дна в формировании основных циркуляционных образований (Литвинов, Фомичев, 1978) в формировании горизонтальной циркуляции водных масс.

В модели полагается, что движение воды обусловливается тангенциальным напряжением ветра над водоемом с учетом влияния рельефа дна, притока в водоем и стока из него. Наклонами свободной поверхности, вызванными сгонами и нагонами вод в результате неравномерности ветра с учетом влияния берегов и стока рек, трением о дно и силой Кориолиса пренебрегается. На поверхности водоема тангенциальное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в воде: $du/dz = T_x$, $Adv/dz = T_y$. Давление равно атмосферному давлению: $p = p_a$. На дне водоема движение отсутствует: $u = v = w = 0$.

Компоненты скорости течения u и v вдоль осей x и y соответственно и понижение уровня ζ определяются по распределению функции полных потоков ψ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \text{rot}_z \frac{\bar{T}}{H}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = - \frac{3T_x}{2gH\rho} - \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial y},$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = -\frac{3T_y}{2gH\rho} + \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

$$u = \frac{T_x(H-Z)}{A} + \frac{g\rho}{A} \left(\frac{H^2 - Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x},$$

$$v = \frac{T_y(H-Z)}{A} + \frac{g\rho}{A} \left(\frac{H^2 - Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

где \vec{T} – вектор тангенциального напряжения ветра, а T_x и T_y – его составляющие по оси x и y ; A – коэффициент вертикального турбулентного обмена: $A = \gamma WH / 4\rho k$, где коэффициент $\gamma = 3.25 \times 10^{-6}$, W – скорость ветра, H – глубина, ρ – плотность воды, k – ветровой коэффициент вязкости для данного водоема; Z – расстояние от поверхности до расчетного горизонта. Следует отметить, что на береговой линии задается сама функция $\psi = 0$, на жидкой границе $-d\psi / dn = 0$.

В результате решения системы уравнений производится расчет скоростей и направлений течения при конкретных гидрометеорологических условиях на отдельных горизонтах в узлах регулярной сеточной области с шагом $\Delta x = \Delta y$ без учета островов. В случае необходимости получения характеристик осредненного от поверхности до дна (интегрального) переноса воды составляющие u и v осредняются по каждой вертикали:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{z=\zeta}^H u dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{z=\zeta}^H v dz.$$

Стационарная модель ветровых течений используется в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН до сих пор и является надежным и простым математическим инструментом изучения особенной структуры течений в разнотипных внутренних водоемах (рис. 4.9, 4.10). Кроме того, на базе модели разработан программный комплекс, включающий набор самостоятельных и взаимосвязанных блоков (математических моделей), предназначенных для:

- изучения особенностей структуры течений в мелководной и глубоководной зонах водохранилищ при различных гидрометеорологических условиях;
- расчета траекторий перемещения единичных объемов воды – индикаторов структуры горизонтальной циркуляции водных масс;
- расчета перемещения и распределения под действием течений скоплений планктона и рыб, выявление зон аккумуляции биомассы;
- расчета распространения вод повышенной мутности, возникающих в результате проведения на водоемах разного рода строительных работ;

Таблица 4.2. Пример расчета динамических высот (оз. Плещеево, 23–24 августа 2014 г.)

H , м	$T^{\circ}\text{C}$	κ_{18}	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³	V_t	V_{tp}	V_{tcp}	ΔZ	$V_{tcp} * \Delta Z$	d'	$d'+\Delta$	D
Станция 1												
1	18.1	280	998.825	0.998825	2.18	2.17						
							2.46	1	2.46	0	13.52	28.2
2	21.0	278	998.2394	0.998239	2.76	2.75				2.46	11.06	25.74
							2.76	1	2.76	5.22	8.3	22.98
3	21.1	278	998.2176	0.998218	2.79	2.77				7.99	5.53	20.21
							2.77	1	2.77	10.76	2.76	17.44
4	21.1	278	998.2154	0.998215	2.79	2.77						
							2.77	1	2.77			
5	21.1	278	998.2154	0.998215	2.79	2.76						
							2.76	1	2.76			
6	21.1	278	998.211	0.998211	2.79	2.76						
										13.52	0	14.68
Станция 2												
1	1.0	278	998.2307	0.998231	2.77	2.77				0	28.76	
							2.76	1	2.76	2.76	26	
2	21.0	278	998.2372	0.998237	2.77	2.76						
							2.76	1	2.76	5.52	23.24	
3	21.0	278	998.2241	0.998224	2.78	2.76						
							2.76	1	2.76			
4	21.0	278	998.2241	0.998224	2.78	2.76						
							2.76	1	2.76			
5	21.1	278	998.2198	0.99822	2.78	2.76						
							2.76	1	2.76			
6	21.1	278	998.2198	0.99822	2.78	2.75						
							2.75	1	2.75			
7	21.0	278	998.2241	0.998224	2.78	2.74						
							2.74	1	2.74			

$H, \text{ м}$	$T^{\circ}\text{C}$	κ_{18}	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\rho, \text{ г/см}^3$	V_t	V_{tp}	V_{tcp}	ΔZ	$V_{tcp} * \Delta Z$	d'	$d'+\Delta$	D
8	21.0	278	998.2307	0.998231	2.77	2.73	2.73	1	2.73		9.47	
9	21.0	278	998.2394	0.998239	2.76	2.72	2.15	1	2.15		6.74	
10	14.9	283	999.3593	0.999359	1.64	1.59	1.41	1	1.41		4.59	
11	12.2	285	999.7164	0.999716	1.28	1.23	1.18	1	1.18		3.18	
12	11.3	286	999.8173	0.999817	1.18	1.12	1.05	1	1.05		2	
13	10.0	287	999.948	0.999948	1.05	0.99	0.95	1	0.95		0.95	
14	9.1	288	1000.023	1.000023	0.98	0.91			28.75		0	

Примечание. Ст. 2 – основная станция, ст. 1 – приводимая станция. D – приведенная динамическая высота.

Таблица 4.3. пример расчета скорости плотностного течения (оз. Плещеево, 23–24 августа 2014 г.)

$H, \text{ м}$	D_1	D_2	ΔD	L	V
1	28.20	28.76	-0.56	0.54	-4.6
2	25.74	26.00	-0.26	0.54	-2.1
3	22.98	23.24	-0.26	0.54	-2.1
4	20.21	20.48	-0.27	0.54	-2.2
5	17.44	17.72	-0.28	0.54	-2.3
6	14.68	14.96	-0.28	0.54	-2.3

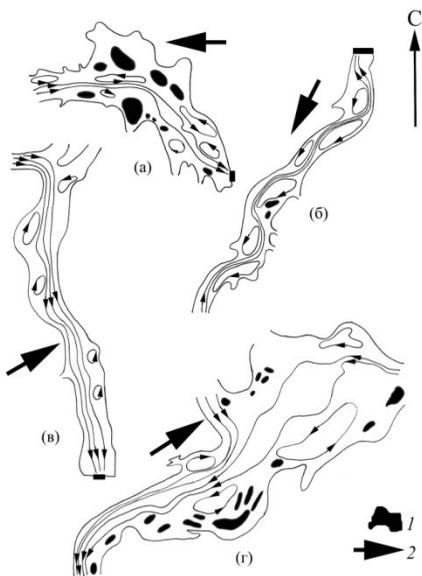


Рис. 4.9. Схемы интегральной циркуляции воды в безледный период в водохранилищах: а – Ивановском, б – Угличском, в – Горьковском, г – Куйбышевском. 1 – острова, 2 – направление ветра.

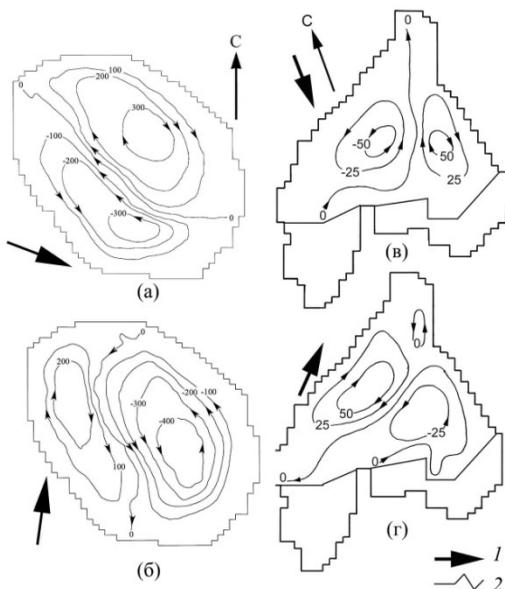


Рис. 4.10. Интегральная циркуляция воды в оз. Пleshчево при ветре 2870 (а) и 1950 (б) скоростью 4.5 м/с и оз. Неро: в – в мае–августе, г – в сентябре–октябре. 1 – направление ветра, 2 – граница распространения макрофитов.

- расчета распространения консервативной и неконсервативной примеси, поступающей в водоем со сточными водами производственной, бытовой и сельскохозяйственной сферы и с водами притоков.

Подробное описание программного комплекса (ПК) приведено в руководстве С.А. Поддубного и Э.В. Суховой «Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах» (2002). Некоторые блоки программного комплекса кратко будут рассмотрены ниже.

4.3.3. Приложения стационарной модели циркуляции водных масс

Расчет перемещения единичных объемов воды. Рассчитанные по гидродинамической модели компоненты вектора скорости используются для лагранжевых построений при вычислении координат движущихся то-

чек. Предполагается, что точки перемещаются только под действием горизонтальных течений, без учета вязкости жидкости и диффузии. На каждом временном шаге значение координат (x, y) точек вычисляются по известным значениям их координат и скорости на предыдущем шаге (Сеидов, Мрушкевич, 1984): $x = x^{n-1} + u^{n-1} \Delta t$; $y = y^{n-1} + v^{n-1} \Delta t$, где n – число циклов расчета. Набор координат $(x^0, y^0), (x^1, y^1), \dots (y^n, y^n)$ определяет траекторию точек. В результате модельных вычислений по окончании любого интересующего интервала времени предусмотрен расчет итогового пути (L), скорости (V) и направления (a) перемещения точек. В целом, рассматриваемая модель описывает нестационарное перемещение точки, группы точек или пятна на фоне стационарного поля течений (рис. 4.11).

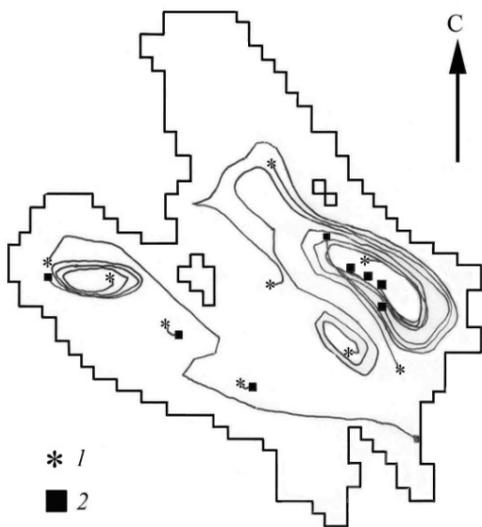


Рис. 4.11. Схема траекторий перемещения единичных объемов воды в Главном плесе Рыбинского водохранилища (соответствует схеме циркуляции воды на рис. 4.3 в). 1, 2 – начальное и конечное положение объемов соответственно.

Проверка результатов моделирования перемещения точек показала, что средняя абсолютная ошибка скорости переноса воды не превышала 2.8 см/с, а направления – 30 град. Использование рассмотренного блока ПК позволяет построить траектории перемещения единичных объемов воды – индикаторов структуры горизонтальной циркуляции воды, а также выявить ее возможные изменения в результате изменений основных формирующих факторов: поля ветра, рельефа дна, притока в водоем. Построение траекторий перемещения скоплений гидробионтов создает основу для составления схем их распределения (аккумуляции или рассеивания) и определения механизмов формирования продуктивных местообитаний в глубоководной зоне. Расчет параметров ветрового волнения.

К основным динамическим параметрам, характеризующим степень воздействия волнения на мелководье, относятся максимальные донные скорости в волновом потоке, глубины начала размыва донных отложений определенной крупности и режимные энергетические показатели (суммарная энергия и ее равнодействующая). В результате изучения распределения параметров ветровых волн (высоты,

длины, периода) с использованием расчетных методов было выявлено, что наиболее удобным для оперативных расчетов может выступать метод Н.А. Лабзовского (1976). Расчет высоты, длины и периода ветровых волн на глубокой воде соответственно по формулам:

$$h_0 = 0.0172KW\sqrt{D}, \lambda_0 = 0.319W\sqrt{D}, T_0 = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_0}{g}},$$

где K – энергетический коэффициент, $K = 1 + 0.75e^{-1.568\frac{D}{W^2}}$; W – скорость ветра (м/с); D – разгон волны (км). На мелководье расчетные формулы имеют вид:

$$h_m = h_0\beta_m, \lambda_m = \lambda_0\alpha_m, T_m = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_m}{g}},$$

где $\alpha_m = 1.185(H/\lambda_0)^{0.44}$ и $\beta_m = 1.065(H/\lambda_0)^{0.28}$ суть эмпирические зависимости, полученные для H/λ_0 в интервале 0.051. Максимальная донная волновая скорость на мелководье вычисляется по формуле:

$$U_m = \frac{2\pi h_m}{T_m e^a - T_m e^{-a}}, \text{ где } a = \frac{2\pi H}{\lambda_m}.$$

Расчет энергетических характеристик производится по формуле:

$$E = \sum_{i=1}^m e_i, e_i = \int_0^l \rho g h_0^2 b n \lambda / 8 T dt, i = 1, \dots, m,$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; h_0 , λ , T – высота, длина и период волны; b – ширина фронта волны; n , сут – продолжительность волнения; m – число румбов ветра (Роль волнения..., 1990).

Расчет воздействия волн и течений на дно водоема. Модельный блок предназначен для выделения областей ветрового волнения, ветровых и стоковых течений по степени их воздействия на дно различных участков водоема (Поддубный, Бычкова, 1998). Предлагаемый метод основан на рассмотрении критических тангенциальных донных напряжений с использованием понятия критической динамической скорости, соответствующей началу движения донных наносов (Алексеевский, Михинов, 1991). Отношения фактических тангенциальных напряжений волновых потоков, ветровых и стоковых течений на дно мелководий к критическому тангенциальному напряжению служат критерием преобладающего проявления указанных видов движения воды в пределах мелководья, ограниченного глубиной $H > 0.5\lambda$ и урезом воды (прибойная и приурезовая зоны, где происходит разрушение волн и их взаимодействие с берегом не выделяются).

Вычислительная процедура включает следующие этапы:

- расчет критических тангенциальных напряжений при конкретном типе донных отложений;
- вычисление максимальных значений удельных тангенциальных напряжений на дне волнового потока;
- вычисление максимальных тангенциальных напряжений на дне ветрового или стокового течения;
- вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке, ветровых и стоковых течениях к критическому тангенциальному напряжению;
- вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке, ветровых и стоковых течениях к суммарному напряжению по всем видам движения.

Критическое тангенциальное напряжение на дно водоема записывается в виде:

$U_{*cp}^2 = 9.8d_{cp}(S-1)\theta_{kp}$. Здесь $S = \rho_s / 1000$, ρ_s – плотность грунта (кг/м³), d_{cp} – средний диаметр частиц донного грунта (м), θ_{kp} – зависит от $D_* = d_{cp} 10^4 \sqrt[3]{9.8S}$: $\theta_{kp} = 0.24(D_*)^{-1}$ при $D_* \leq 4$; $\theta_{kp} = 0.14(D_*)^{-0.66}$ при $4 < D_* \leq 10$; $\theta_{kp} = 0.04(D_*)^{-0.1}$ при $10 < D_* \leq 20$; $\theta_{kp} = 0.013(D_*)^{0.29}$ при $20 < D_* \leq 150$; $\theta_{kp} = 0.055$ при $D_* > 150$.

Максимальное тангенциальное напряжение на дне волнового потока выражается как:

$$U_{*m}^2 = fU_m^2 / 2,$$

где $f = \exp(5.213 \times (k_s / a_\delta)^{0.194} - 5.977)$ при $k_s / a_\delta < 0.63$, $f = 0.3$ при $k_s / a_\delta \geq 0.63$, $k_s = 2.5 \times d_{cp}$, $a_\delta = U_m / 2\pi \times T_m$, а U_m и T_m – максимальная донная скорость и период волны на мелководье, рассчитанные в блоке расчета волн.

Максимальное тангенциальное напряжение на дне ветрового течения вычисляется по формуле: $U_{*g}^2 = V_g^2 / (2.5 \times \ln(4 \times H / d_{cp} + 1))^2$, V_g – скорость ветрового течения. Максимальное тангенциальное напряжение на дне стокового течения рассчитывается по формуле: $U_{*c}^2 = V_c^2 / (2.5 \times \ln(4 \times H / d_{cp} + 1))^2$, V_c – скорость стокового течения.

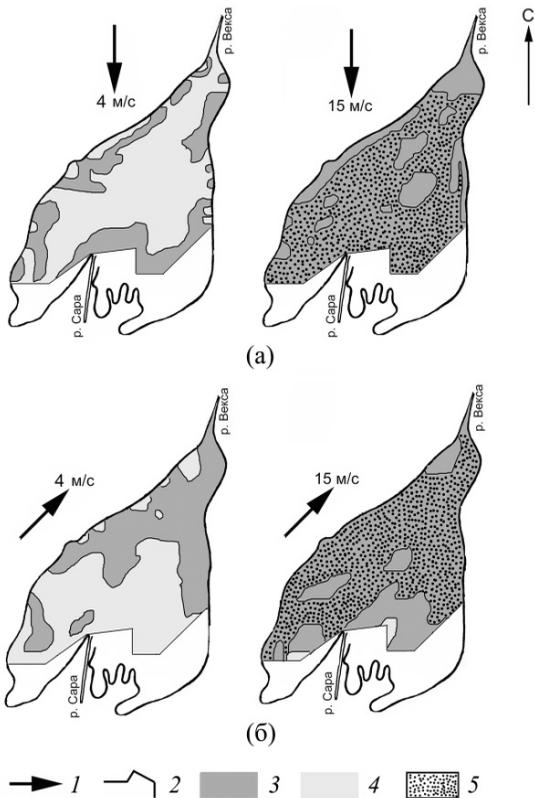


Рис. 4.12. Схемы распределения областей преобладающего воздействия на дно озера волн и течений: а – при северном ветре, б – при юго-западном ветре. 1 – направление ветра, 2 – граница распространения макрофитов, 3 – волны, 4 – течения, 5 – эрозия дна (по: Бикбулатов и др., 2003).

Отношения максимальных тангенциальных напряжений на дне волнового, ветрового и стокового течений к критическому записываются соответственно в виде выражений:

$$N_1 = \frac{U_{*m}^2}{U_{*кр}^2}, \quad N_2 = \frac{U_{*б}^2}{U_{*кр}^2},$$

$$N_3 = \frac{U_{*с}^2}{U_{*кр}^2}.$$

Отношения максимальных тангенциальных донных напряжений к суммарному напряжению по всем видам движения вычисляются по формулам:

$$M_1 = \frac{U_{*m}^2}{\Sigma}, \quad M_2 = \frac{U_{*б}^2}{\Sigma},$$

$$M_3 = \frac{U_{*с}^2}{\Sigma},$$

где $\Sigma = U_{*m}^2 + U_{*б}^2 + U_{*с}^2$.

Результаты расчета воздействия указанных характеристик на дно водоема приведены на рис. 4.12.

4.4. Нестационарные расчеты гидротермодинамических процессов

4.4.1. Бароклинные эффекты в динамике равнинного водохранилища

Роль бароклинных эффектов в динамике вод равнинного водохранилища (на примере Рыбинского водохранилища) рассматривается путем численных экспериментов по расчету градиентных течений на основе диагностической модели, являющейся одной из модификаций полной прогностической модели динамики морских течений (Демин и др., 1991). Среди главных отличий от ранее используемой стационарной модели необходимо выделить следующие: модель основана на полных уравнениях движения (нелинейная модель); интегральной функцией модели является уровень водоема, а не функция полных потоков; уравнение для интегральной функции получено сразу в разностном виде из уравнений движения, гидростатики и неразрывности и из разностных граничных условий; разностная схема энергетически сбалансирована и удовлетворяет основным законам сохранения; модель позволяет решать как стационарные, так и нестационарные задачи; модель позволяет воспроизводить поля вертикальной скорости. Исходные уравнения диагностического варианта модели, начальные и граничные условия детально приведены в работе (Демин и др., 1991).

Расчеты градиентных течений проведены для двух вариантов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости с шагом по времени 3 мин.

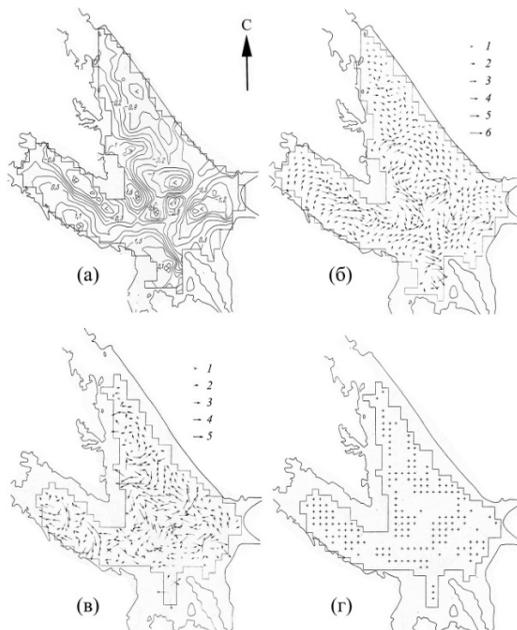


Рис. 4.13. Топография уровневой поверхности, мм (а), поля течений на глубине 1 (б) и 5 м (в), поле вертикальной скорости на глубине 5 м (крестиками отмечены участки подъема вод). Масштаб скорости: б – 1–6 – 0.2, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 и 3.3 см/с, в – 1–5 – 0.1, 0.4, 0.8, 1.2 и 1.6 см/с соответственно (Демин и др., 1991).

Роль прямого эффекта ветра не учитывалась. В результате сравнения модельных вычислений и натуральных данных, полученных на АБС, выявлено их удовлетворительное соответствие, что свидетельствует о важности бароклинных эффектов при расчете течений. Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 4.13.

4.4.2. Расчет течений с использованием уравнений теории мелкой воды

Учитывая особенности гидрологических процессов в крупных равнинных водохранилищах и большом ряде озер, система мелкой воды для них является наиболее подходящей моделью для описания пространственно-временной изменчивости структуры течений под влиянием различных внешних факторов. Естественно, что упрощенные уравнения имеют ограниченную область применения и определенные недостатки, которые выявляются в процессе численной реализации и верификации модели (Подгорный, 2003). Применение уравнений мелкой воды успешно использовалось при моделировании динамики вод и распространения загрязняющих веществ в Ивановском водохранилище (Даценко и др., 2000), а также для расчетов течений, переноса наносов и интенсивности переформирования дна в мелководном оз. Неро при различных гидрометеорологических ситуациях (Поздняков и др., 2020). Система уравнений Сен-Венана без учета турбулентного перемешивания имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{h+\zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \frac{1}{h+\zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz \\
 H &= h + \zeta \\
 \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV + g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho H} \tau_x^s &= 0 \\
 \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fU + g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho H} \tau_y^s &= 0 \\
 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} &= 0
 \end{aligned}$$

где U и V – проекции вектора средней по глубине скорости на оси координат, ось OX направлена на восток, ось OY – на север, ось OZ – вверх; ζ – возвышение свободной поверхности над поверхностью уровня воды; h – расстояние от отсчетной поверхности уровня до дна; H – полная глубина водоема в заданный момент времени; f – параметр

Кориолиса; g – ускорение свободного падения; τ_x^s, τ_y^s – проекции касательного напряжения ветра на оси координат; ρ – плотность воды; C – коэффициент Шези (Подгорный, 2003).

Моделирование циркуляции воды по приведенной модели выполнялось для разномасштабных водных объектов: руслового пруда с горизонтальным размером 55–65 на 40–50 м, устьевой области малой реки длиной 3500 м и средней шириной ~300 м, Волжского плеса Рыбинского водохранилища протяженностью ~25 км и Главного плеса водохранилища. Шаг расчетной сетки соответственно составлял 5, 50, 250 и 2000 м. В результате вычислений в пределах всех водных объектов в зависимости от гидрометеорологической ситуации было выявлено формирование циркуляционных зон и областей транзитного переноса воды (рис. 4.14, 4.15). Время установления течений зависело от внешнего воздействия и масштаба водоема. Так, в пруду течения определялись стоком реки и устанавливались за 20–40 мин от состояния покоя. В устьевой области реки время формирования устойчивой пространственной структуры течений изменяется от 6 до 10 ч. В Волжском и Главном плесах время установления течений может достигать 14–18 ч. Удовлетворительная верификация модели позволила сделать вывод о ее применимости к моделированию циркуляции вод водоемах разного типа (Поддубный и др., 2011, 2013).

Гидродинамический блок, основанный на решении уравнений мелкой воды использовался для моделирования пространственно временной динамики полей средней по вертикали температуры воды Рыбинского водохранилища с учетом двумерного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U \partial T}{\partial x} + \frac{V \partial T}{\partial y} = (A_\eta)_T \Delta_\eta T + \frac{Q_{\text{surf}} - Q_{\text{bott}}}{H}$$

В уравнении T – средняя по вертикали температура воды, U, V – проекции вектора средней по глубине скорости на оси координат X, Y ; H – глубина водоема; $(A_\eta)_T$ – коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности; Δ_η – двумерный оператор Лапласа; $Q_{\text{surf}}, Q_{\text{bott}}$ – кинематические потоки тепла на поверхности водоема и на дне соответственно; t – время (Поддубный, Подгорный, 2009).

В результате моделирования было отмечено, что расчетные данные хорошо укладываются в наблюдаемый диапазон природной средне-многолетней изменчивости температуры воды (рис. 4.16).

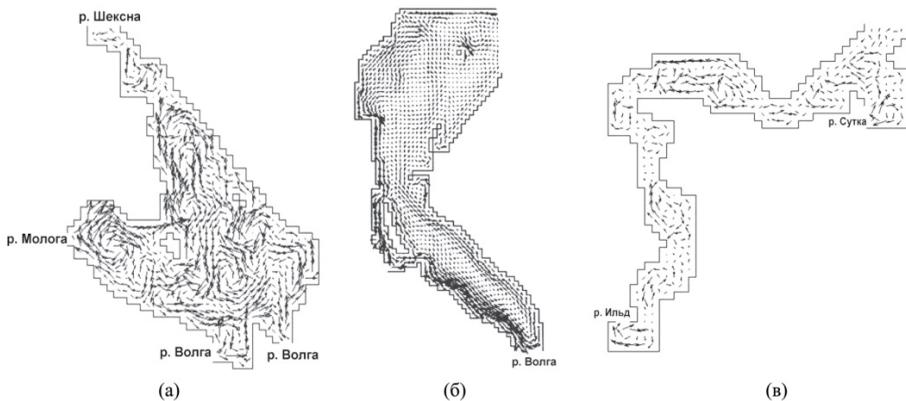


Рис. 4.14. Примеры структуры поля течений: а – Рыбинское водохранилище (скорость ветра 6.9 м/с, направление ветра 50°, максимальная скорость течения 16.3 см/с, средняя – 5.6 см/с); б – Волжский плес Рыбинского водохранилища (скорость ветра 2.0 м/с, направление ветра 315°, максимальная скорость течения 3.5 см/с, средняя – 0.5 см/с); в – устьевая зона р. Ильд при различных скоростях и направлениях ветра, а также уровня воды (скорость ветра 2.9 м/с, направление ветра 170°, максимальная скорость течения 3.1 см/с, средняя – 1.2 см/с) (Поддубный и др., 2011).

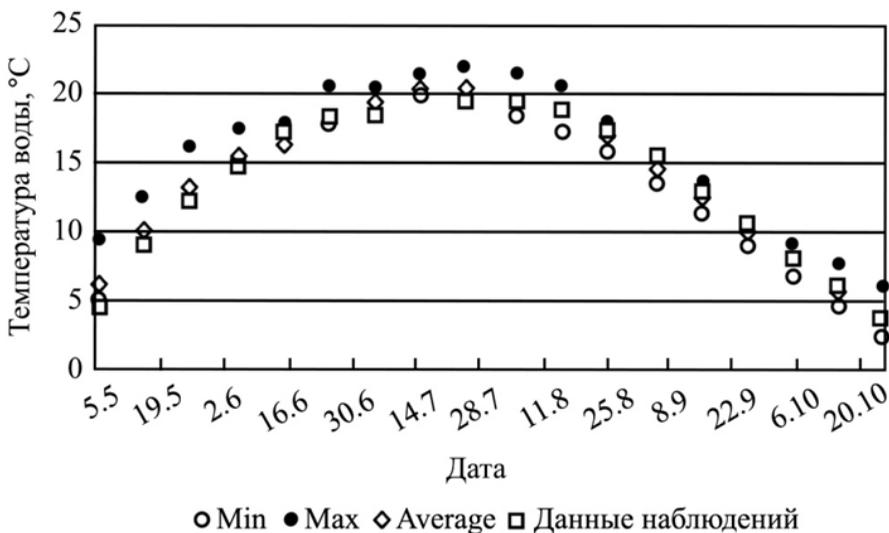


Рис. 4.16. Сравнение результатов модельных расчетов температуры воды со средними многолетними значениями (Поддубный, Подгорный, 2009).

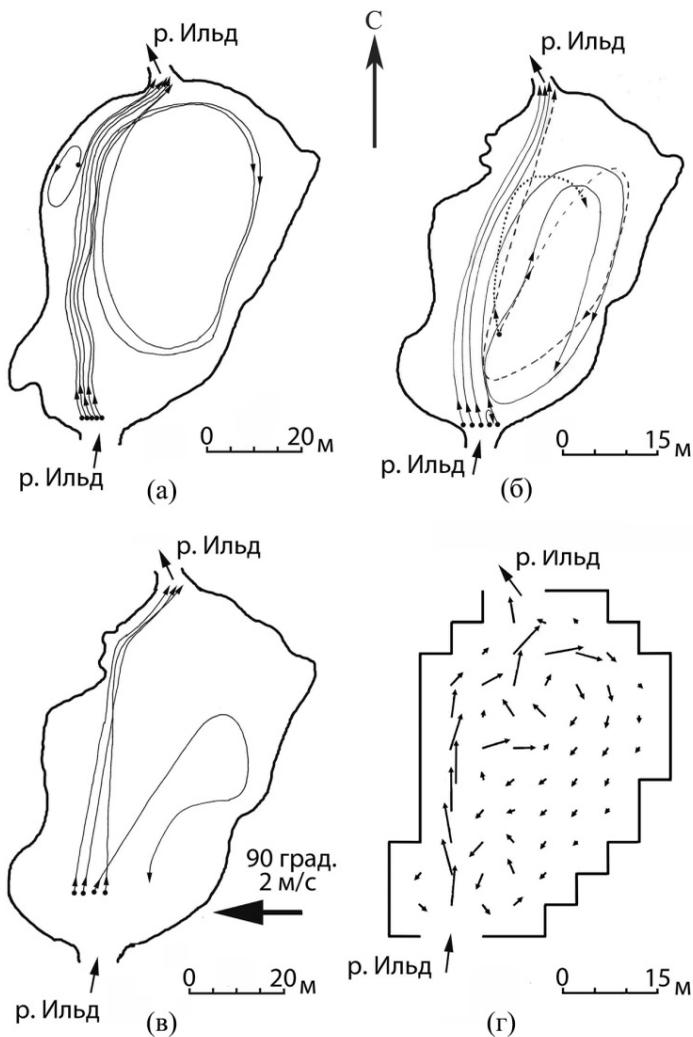


Рис. 4.15. Схемы горизонтальной циркуляции воды в русловом пруду р. Ильд: а – измерения 20.04.2007 г., б – измерения 03.05.2007 г., в – измерения 07.06.2007 г., г – рассчитанная циркуляция воды при расходе р. Ильд $4.43 \text{ м}^3/\text{с}$ и отсутствии ветра (Поддубный и др., 2013).

Глава 5. Химические исследования водных экосистем

При комплексном изучении биоценозов и организмов, обитающих в разнотипных внутренних водоемах и водотоках, важное значение приобретает знание физических свойств воды и ее химического состава. Становление этих характеристик определяется рядом природных факторов, что и обуславливает их большее или меньшее различие в разных водах. В каждом конкретном водоеме физические и химические свойства воды изменяются в зависимости от времени суток, от сезона года и в разные годы. Поэтому для получения представления о пространственно-временных колебаниях упомянутых свойств воды требуется периодическое их изучение с привлечением различных приборов и методов.

В настоящее время при возрастающем воздействии антропогенного фактора происходит значительное изменение установившихся физических свойств воды и ее химического состава. Природные воды, используемые человеком для бытовых нужд и для всесторонней производственной деятельности, возвращаются в водоемы (водотоки) с иными характеристиками, определяющимися теми примесями, которые в них поступили, и степенью очистки сточных вод от них. Изменение природных характеристик воды может происходить и при использовании водоемов транспортными средствами, для рекреационных целей, при разработке на берегу и в прибрежной зоне природных ископаемых и т.д. В результате исходные воды могут обогащаться некоторыми из тех химических соединений, которые уже в них имелись, однако чаще в водоемы в этих случаях поступают новые для них химические соединения или вещества в растворенном или взвешенном состоянии. В связи с этим программа изучения физических свойств воды и ее химического состава должна расширяться, при обязательном условии сохранения в ней тех ее разделов, по которым проводится исследование незагрязненных вод (Методика изучения..., 1975).

5.1. Критерии качества воды и необходимость их использования при изучении внутренних водоемов

Известная фраза «Вода – это жизнь» подразумевает, что качество жизни напрямую зависит от качества воды. Что такое качество воды? В ГОСТ 17.1.1.01-77 (п. 4) дано такое определение: «Качество воды – характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования». Водопользование – это пользование водами (водными объектами) для удовлетворения нужд населения (пить-

евого водоснабжение, рекреационное), сельского хозяйства, рыбного хозяйства, промышленности, транспорта и др. Очевидно, что в зависимости от вида водопользования применяют различные критерии – «критерий качества воды: Признак, по которому производится оценка качества воды по видам водопользования» (ГОСТ 17.1.1.01-77 (п. 5) .

Оценка качества пресноводных водоемов осуществляется по трем основным направлениям:

- физико-географическое и гидрологическое описание водоема, как природного или водохозяйственного объекта;

- контроль показателей состава и свойств воды, дающий оценку качества воды и ее соответствия действующим нормативам;

- критерии, оценивающие структурно-функциональную организацию сообществ гидробионтов и динамику развития водных биоценозов.

Физико-географическое описание водоема (место расположения, ландшафтные, природно-климатические и геолого-морфологические условия на водосборе) дает представление об условиях формирования химического состава поверхностных вод. Гидрологическая характеристика может включать морфометрические параметры, динамику водных и ветровых переносов, условия и интенсивность поступления в водоем загрязняющих веществ от точечных и распределенных источников, условия водопользования и др.

Вид водопользования определяет набор контролируемых показателей. В качестве основного критерия качества воды чаще всего используют понятие предельная допустимая концентрация вещества (ПДК) – максимальное содержание загрязняющего вещества в компонентах окружающей среды, при постоянном контакте с которым в течение длительного времени не возникает негативных последствий в организме человека или другого рецептора. Нормативы (с применением ПДК) качества воды устанавливают законодательно для конкретного вида водопользования. В настоящее время используют два вида ПДК: ПДК в воде водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового и ПДК в воде водоема для рыбохозяйственных целей. Для 80 % элементов и веществ ПДК для рыбохозяйственных водоемов жестче, чем гигиенические нормативы.

В течение многих лет качество воды оценивали по отдельным компонентам химического состава воды. Система оценки качества воды по большому числу отдельных показателей сложна и неудобна, логичным выходом из этой ситуации было бы наличие комплексного показателя загрязнения. С 70-х годов прошлого века было разработано много разнообразных комплексных показателей, но ни один из них не является совершенным. Прежде всего, не существует единого комплексного показателя,

который бы объединил оценку качества разных водных объектов. Возможным выходом было бы создание региональных комплексных показателей качества воды, которые учитывали бы естественных повышенный гидрохимический фон некоторых отдельных компонентов.

Поэтому, исследователи выбирают систему оценки качества воды, подходящую для решения поставленных ими задач. Так, при изучении водных экосистем, как природных объектов, представляющих собой единство среды и обитающей в ней биоты, необходимо охарактеризовать показатели воды как среды обитания и показатели биотической (организменной) части экосистемы. Процессы, протекающие на водосборе и внутри водоема либо водотока, формируют определенное состояние водной экосистемы. Природные условия на водосборе формируют физические свойства воды и ее химический состав и обуславливают изменчивость их в разных водных объектах. Кроме того, в одном и том же водоеме свойства воды могут меняться в зависимости от времени суток, сезона и в различные годы. Дополнительный вклад в изменчивость характеристик воды вносит антропогенная составляющая. При наличии источников загрязнения (точечных или дисперсных) следует учитывать и их влияние на качество воды в водоеме. Поэтому для изучения колебаний параметров водной среды необходима программа исследований, которая предусматривала бы периодическое изучение гидрохимических характеристик.

5.2. Выбор пунктов наблюдений и исследуемых компонентов химического состава воды

Разработка программы гидрохимических исследований сопряжена с некоторыми трудностями: разнообразие методик, сложность водного объекта, сложность организации отбора проб. Программа исследований определяет выбор пунктов наблюдений, периодичность отбора проб и набор исследуемых компонентов химического состава воды. Пункты отбора проб воды должны отражать характерные черты водоема. При наличии источников загрязнения необходимо отбирать воду выше и ниже источника загрязнения. При значительной глубине водного объекта полезно отбирать пробы как с поверхности, так и у дна. Отбор проб воды и рекомендованные сроки проведения анализа воды на исследуемые компоненты регламентирован ГОСТ 31861-2012 «ВОДА. Общие требования к отбору проб». В документе указаны также критерии выбора устройств для отбора проб:

– предохранение состава пробы от потерь определяемых показателей или от загрязнения другими веществами;

- устойчивость к экстремальным температурам и разрушению; способность легко и плотно закрываться;
- необходимые размеры, форма, масса; пригодность к повторному использованию;
- светопроницаемость;
- химическая (биологическая) инертность материала, использованного для изготовления емкости и ее пробки. Обычно в качестве пробоотборника используют батометр Рутнера.

В ГОСТ 31861-2012 также приведены условия и сроки хранения проб до проведения анализа. Кроме того, в каждой методике указаны условия отбора, хранения и проведения анализа отобранных проб. В идеальном случае отбор проб воды необходимо проводить в различные сезоны, чтобы охарактеризовать сезонную динамику гидрохимических характеристик. Однако, на практике такие работы требуют серьезных материальных затрат и часто не могут быть реализованы. В таком случае отбор проб воды может быть однократным в течение вегетационного периода, при условии, что пункты наблюдений остаются неизменными, а сроки отбора проб (каждый год) на водоеме остаются теми же.

Для получения гидрохимической характеристики водоема как среды обитания гидробионтов необходимо иметь представление о солевом составе (щелочность, хлориды, сульфаты, общая жесткость, кальций, магний, натрий, калий) воды, содержании в ней органических веществ и оценка их устойчивости (БПК₅), косвенном определении количества органических веществ (перманганатная и бихроматная окисляемости), количестве органического углерода, содержании биогенных элементов (минеральные формы азота и фосфора, а также их валовое содержание). При наличии источников загрязнения необходимо также проводить анализ воды на содержание потенциальных загрязняющих веществ. Это могут быть нефтепродукты, фенолы, АПАВ, тяжелые металлы. Аналитические возможности лаборатории определяют набор компонентов.

5.3. Методы анализа химического состава воды

5.3.1. Прозрачность, цветность, рН, растворенный кислород

Прозрачность воды. Прозрачность воды измеряется белым диском (дискон Секки). Диск на линии с марками через 10 см медленно опускают в воду с теневой стороны лодки или судна. В момент, когда диск становится невидимым, отмечают глубину по маркам линии. Затем, опустив несколько диск, медленно поднимают его сверху и фиксируют глубину, когда он снова становится видимым. Средняя из этих двух измерений принимается за ве-

личину прозрачности воды в метрах. Для предотвращения ошибок определения желательно повторять измерения два-три раза, а величину прозрачности вычислять как среднее из всех измерений. Величина прозрачности записывается с точностью до 10 см (Методика изучения..., 1975).

Цветность воды. Для определения цветности слабо и сильноокрашенных прозрачных вод используют метод сравнения с искусственными стандартами. Анализ основан на визуальном сравнении цвета испытуемой воды со стандартной окраской, создаваемой в растворе бихроматом калия $K_2Cr_2O_7$ и сульфата кобальта $CoSO_4 \cdot 2 H_2O$. Путем разбавления основного раствора готовят шкалу цветности с шагом в 5 градусов.

Помимо визуального метода применяется и фотометрический метод определения цветности воды, который основан на измерении оптической плотности или коэффициента пропускания анализируемой пробы воды при фиксированной длине волны с последующим определением значения цветности по градуировочной характеристике. Для установления последней измеряют оптическую плотность или коэффициент пропускания растворов хром-кобальтовой шкалы цветности при длине волны 380 нм или растворов платино-кобальтовой шкалы цветности при длине волны 410 нм в оптических кюветах толщиной поглощающего слоя 5 или 10 см относительно дистиллированной воды (холостая проба). Полученное значение выражается в градусах цветности.

Определение рН. Для определения концентрации ионов водорода (рН) пользуются колориметрическим и электрометрическим методами. К недостаткам первого метода следует отнести: а) недостаточно высокую точность получаемых результатов, б) затруднения, возникающие при определении рН окрашенных и мутных вод, в) необходимость введения солевых поправок, г) значительную погрешность при очень малой минерализации воды. В связи с этим более распространен второй (потенциометрический) метод, имеющий большую точность (0.02 ед. рН) и не зависящий от цвета и мутности воды. Потенциометрический метод определения рН воды основан на измерении электродвижущей силы электродной системы, состоящей из стеклянного электрода, потенциал которого определяется активностью водородных ионов и вспомогательного электрода сравнения с известным потенциалом (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97).

Растворенный кислород. Для определения растворенного кислорода разработано множество методов с различной чувствительностью. Однако на практике используют, как правило, всего два: йодометрический метод Винклера и электрохимический с применением оксиметров. Титриметрический (йодометрический) метод определения массовой кон-

центрации растворенного кислорода основан на его реакции с гидроксидом марганца (II) в щелочной среде. Последний количественно связывает кислород, переходя при этом в соединение марганца (IV). При подкислении пробы в присутствии избытка иодида калия образуется йод, количество которого эквивалентно содержанию кислорода и определяется титрованием раствором тиосульфата натрия (ПНД Ф 14.1:2.101-97).

Электрохимический метод с применением оксиметров представляется весьма удобным в полевых условиях, но имеет существенный недостаток – мембрана датчика в окрашенных и мутных водах может забиваться взвешенными веществами, что зачастую приводит к неправильным результатам. В таких случаях определение растворенного кислорода проводят еще и методом Винклера, который служит арбитражным.

5.3.2. Солевой состав воды

Щелочность (гидрокарбонаты). Щелочность – сумма анионов слабых кислот, присутствующих в водах. Различают свободную, карбонатную и общую щелочность. В пресных незагрязненных водах количество анионов угольной кислоты так велико по сравнению с другими анионами, что карбонатная щелочность становится равна общей, а концентрация гидрокарбонатов определяет величину щелочности. Для определения концентрации гидрокарбонатов применяют следующие методы.

1. Прямое титрование пробы воды сильной кислотой в присутствии индикатора, имеющего переход окраски в области pH 3–4. Метод недостаточно точен.

2. Обратное титрование, основанное на прибавлении избытка сильной кислоты и его титровании в присутствии индикатора раствором буры. Метод более точен, но имеет существенные ограничения – при анализе окрашенных и мутных вод, а также вод со щелочностью менее 10 мг $\text{HCO}_3^-/\text{дм}^3$ погрешность метода возрастает.

3. Потенциометрическое титрование исследуемой воды соляной кислотой с концентрацией 0.02 или 0.05 моль/дм³ до pH = 4.5. Метод прост и предпочтителен для применения (ПНД Ф 14.2.99-97).

Хлорид-ионы. Для определения концентраций хлорид-ионов продолжительное время использовали стандартные титриметрические методы.

Аргентометрический метод, основан на выпадении хлористого серебра при добавлении в воду азотнокислого серебра известной концентрации. Метод предназначен для анализа вод с содержанием хлоридов более 10 мгCl⁻/дм³, более надежные результаты – при концентрациях хлоридов выше 40 мг/дм³.

Меркуриметрический метод (ПНД Ф 14.1:2.111-97) основан на взаимодействии хлорид-ионов с ионами ртути (II) с образованием малодиссоциированного соединения хлорида ртути. Диапазон определяемых концентраций 10–100 мг Cl⁻/дм³. Если концентрация хлорид ионов выше или ниже границ диапазона, то допускается разбавление, либо концентрирование анализируемой воды. Оба метода имеют довольно длинный перечень мешающих влияний, устранение которых требует значительного времени.

Сульфат-ионы. Наиболее распространенным методом определения сульфатов является весовой, его рекомендуют использовать в качестве арбитражного в силу наиболее высокой точности. Существенным недостатком этого метода служит трудоемкость и длительность. Тем не менее, в лаборатории гидрохимии в течение значительного времени определение сульфат-ионов проводили именно этим методом.

При анализе воды с концентрацией сульфатов более 10 мг/дм³ применяли метод титриметрического определения с солью бария в присутствии ортанилового К. Для получения корректных результатов требуется устранение мешающих влияний окрашенных и взвешенных веществ, а также ионов кальция и магния. Кроме того, для анализа слабоокрашенных вод с содержанием сульфатов выше 1–2 мг/дм³ использовали турбидиметрический метод, основанный на измерении интенсивности помутнения растворов с сульфатными ионами в присутствии солей бария. Для стабилизации суспензии в реакционную смесь добавляли этиленгликоль. Перед анализом необходимо устранять мешающее влияние окрашенных и взвешенных веществ, гидрокарбонатов и карбонатов.

Общая жесткость. Продолжительное время для определения общей жесткости (суммы ионов кальция и магния) используют метод (ПНД Ф 14.1:2.98-97) титрования пробы воды раствором динатриевой соли этилендиамина тетрауксусной кислоты (трилон Б) в присутствии индикатора эриохрома черного Т (хромогена черного). Диапазон определяемых концентраций 0.5–8.0 мг-экв/дм³. Определению мешают цветность, мутность, железо, кобальт, никель, алюминий, медь, которые могут приводить к нечеткому изменению окраски при титровании. Свинец, кадмий, марганец (II), стронций, барий титруются вместе с кальцием и могут завышать результат определения.

Для определение концентрации иона кальция (ПНД Ф 14.1:2.95-97) так же, как и при определении общей жесткости, применяют титрование пробы трилоном Б, но в присутствии другого индикатора (мурексиды). Концентрацию иона магния рассчитывают как разность между величиной общей жесткости и концентрации кальция.

Натрий и калий. Измерение массовой концентрации ионов натрия и калия в поверхностных водах суши проводят наиболее распространенным методом пламенной фотометрии, который обеспечивает определение обоих металлов в концентрациях много ниже ПДК. В основу определения положена способность атомов натрия и калия возбуждаться в пламени и при переходе в нормальное состояние излучать свет определенных длин волн. В испускаемом свете выделяют характерную для определяемого металла спектральную линию ($\lambda = 589$ нм для натрия и 768 нм для калия). Ее интенсивность, пропорциональная содержанию определяемого металла, регистрируется как аналитический сигнал.

Развитие аналитического приборостроения привело к разработке более современных и удобных методик определения компонентов солевого состава природных вод. Одним из наиболее перспективных и применяемых для рутинного анализа проб воды является метод капиллярного электрофореза. Метод капиллярного электрофореза основан на разделении заряженных компонентов сложной смеси в кварцевом капилляре под действием приложенного электрического поля. Микрообъем анализируемого раствора вводят в кварцевый капилляр, предварительно заполненный подходящим буфером-электролитом. После подачи высокого напряжения (до 30 кВ) к концам капилляра компоненты смеси начинают двигаться с разной скоростью, зависящей от заряда и массы. Полученная последовательность пиков называется электрофореграммой; качественной характеристикой вещества является время миграции, а количественной – высота или площадь пика, пропорциональная концентрации вещества.

Метод капиллярного электрофореза (ПНД Ф 14.1:2:4.157-99) позволяет одновременно определять в одной пробе сразу несколько анионов – хлорид, нитрит, сульфат, нитрат, фторид и фосфат. Диапазон измеряемых концентраций для хлоридов и сульфатов $0.5\text{--}200$ мг/дм³; нитритов и нитратов $0.2\text{--}50$ мг/дм³; фторидов $0.1\text{--}10.0$ мг/дм³; фосфатов $0.25\text{--}25.0$ мг/дм³. Анализ воды на содержание нитрит-, нитрат- и фосфат-ионов необходимо проводить в течение первых суток, консервирование пробы недопустимо. Для измерения массовых концентраций катионов также применяют метод капиллярного электрофореза (ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000). Диапазон измеряемых концентраций аммония, калия, кальция, натрия $0.5\text{--}5000$ мг/дм³; барий $0.1\text{--}10$ мг/дм³; литий $0.015\text{--}2$ мг/дм³; магний $0.25\text{--}2500$ мг/дм³; стронций $0.25\text{--}50$ мг/дм³. Пробу воды необходимо проанализировать в первые сутки, если необходимо знать концентрацию аммоний-иона.

Для анализа в лаборатории используют системы капиллярного электрофореза «Капель103Р» и «Капель 105».

5.3.3. Органическое вещество

Биохимическое потребление кислорода (БПК). Находящиеся в воде микроорганизмы способны потреблять растворенный кислород при биохимическом окислении органических веществ. Наблюдающаяся в аэробных условиях убыль растворенного кислорода за определенный промежуток времени называется биохимическим потреблением кислорода (в $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$). Обычно инкубация проводится в специальных склянках с притертыми пробками и закрытыми сверху стеклянными колпачками, наполненными водой, в течение 5 сут в темноте при 20°C и обозначается через БПК_5 . Это определение дает относительное представление о содержании легкоокисляющегося в воде органического вещества. Чем выше его концентрация, тем больше потребление кислорода. При наличии в воде значительных количеств органических веществ исходную пробу разбавляют, при подсчете результата учитывают коэффициент разбавления. Концентрацию кислорода в начале и конце инкубации определяют тем же методом, что и растворенный кислород. Возможно применение амперометрического метода определения растворенного кислорода (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97).

Поскольку прямого метода измерения концентрации органического вещества нет, используют косвенные методы, позволяющие оценить количество и качество (легко- и трудноокисляемые) органических веществ в природной воде. Ни одним из наиболее доступных методов не удастся достичь полного окисления органических веществ, поэтому полученные результаты следует считать приближенными. В зависимости от используемого окислителя различают перманганатную и бихроматную окисляемость.

Перманганатная окисляемость. Перманганатную окисляемость определяют титриметрическим методом в питьевых и природных водах в диапазоне от 0.25 до 100 $\text{мгО}/\text{дм}^3$. Метод основан на окислении веществ, присутствующих в пробе воды известным количеством перманганата калия в сернокислой среде при кипячении в течение 10 мин. Не вошедший в реакцию перманганат калия восстанавливают щавелевой кислотой. Избыток щавелевой кислоты оттитровывают раствором перманганата калия (ПНД Ф 14.2:4.154-99). Такой метод позволяет оценить количество легкоокисляемого органического вещества.

Бихроматная окисляемость (химическое потребление кислорода – ХПК). Титриметрический метод определения ХПК основан на окислении органических веществ избытком бихромата калия в растворе серной кислоты в присутствии катализатора – сульфата серебра в специальных колбачках, к которым присоединены холодильники, через которые проходит

вода для охлаждения. Остаток бихромата калия находят титрованием раствором соли Мора и по разности определяют количество $K_2Cr_2O_7$, израсходованное на окисление органических веществ (ПНДФ 14.1:2.100-97).

Наряду с титриметрическим методом определения бихроматной окисляемости (ХПК) в пробах воды, также применяется фотометрический метод определения ХПК с применением анализатора жидкости «Флюорат-02» (ПНДФ 14.1:2:4.190-2003). Принцип метода основан на обработке пробы воды серной кислотой и бихроматом калия при температуре в термореакторе $(150 \pm 5)^\circ C$ в присутствии катализатора окисления – сульфата серебра и при добавлении сульфата ртути (II), используемого для снижения влияния хлоридов. Измерение оптической плотности раствора проводится в диапазоне λ 340–380 нм или 580–620 нм в зависимости от ожидаемых значений ХПК.

Диапазон измеряемых значений ХПК от 5 до 800 мг O/dm^3 . Измерения ХПК свыше 800 мг O/dm^3 проводят, предварительно разбавив пробу, но не более чем в 20 раз. Определению не мешают железо (II) при содержании < 5 мг/ dm^3 , сульфиды при содержании < 3 мг/ dm^3 , хлориды при содержании до 500 мг/ dm^3 и марганец (II) при содержании менее 50 (II). Их влияние при более высоких концентрациях устраняется специальной подготовкой пробы согласно методике. По соотношению перманганатной и бихроматной окисляемостей можно судить о природе органического вещества в воде.

Органический углерод. Доля органического углерода составляет около половины всех органических веществ в природной воде. Поэтому по его количеству можно судить об общем содержании органических веществ в воде. Существующие методы определения органического углерода основаны преимущественно на окислении органических веществ до двуокиси углерода.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН разработан простой персульфатный способ окисления органического вещества природных вод для определения углерода (Бикбулатов, 1974). В качестве реакционного сосуда используется пробирка из молибденового стекла объемом 35–40 мл с шлифованной пробкой. Полнота окисления и хорошая воспроизводимость позволяют рекомендовать этот метод для определения органического углерода в пресных водах. Также следует отметить и фотохимический метод измерения количества валового органического углерода в природных водах (Бикбулатова и др., 1969), в основу которого положен принцип разложения органических соединений под действием ультрафиолетовых лучей. Процесс разложения происходит без участия реактивов-окислителей, что позволяет избежать поправки на реактивы.

Преимуществом этого метода является также то, что не требуется предварительного упаривания проб воды, что предотвращает потерю органических веществ.

5.3.4. Биогенные элементы

Азот минеральный. Аммоний-ион. Давно используемым методом измерения массовой концентрации ионов аммония ($0.05\text{--}4.0$ мг/дм³) в природных водах является фотометрический метод с реактивом Несслера. Метод основан на взаимодействии аммоний-ионов с реактивом Несслера с образованием коричневой соли. Светопоглощение раствора измеряют при длине волны $\lambda = 425$ нм в кюветах с длиной поглощающего слоя 10 или 50 мм. Интенсивность окраски прямо пропорциональна концентрации аммоний-иона. Мешающие влияния, обусловленные присутствием аминов, хлорамина, ацетона, альдегидов, спиртов, фенолов, компонентов жесткости воды, взвешенных веществ, железа, сульфидов устраняют специальной подготовкой к анализу (ПНД Ф 14.1.1-95). В этом случае применяют метод с предварительной отгонкой аммиака.

Нитриты. Для наблюдений за содержанием нитритов в природной воде рекомендованы два метода: фотометрический с реактивом Грисса (наиболее доступный) и спектрофотометрический с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилендиамином (наиболее чувствительный). Фотометрический метод с реактивом Грисса (ПНДФ Ф 14. 1:2. 3-95) предназначен для измерения массовой концентрации нитрит-ионов $0.02\text{--}0.30$ мг/дм³ в природных водах. Определению мешают мутность и взвешенные вещества. Трехвалентное железо, двухвалентная ртуть, серебро, висмут, трехвалентная сурьма, свинец, трехвалентное золото, хлорплатинаты и метаванадаты мешают определению, так как выпадают в осадок. В анализируемой пробе не должны присутствовать сильные окислители или восстановители. Определению мешает также окраска воды и трихлорамин, двухвалентная медь, которая занижает результаты вследствие вызываемого ее каталитического распада диазотированной сульфаниловой кислоты.

Спектрофотометрический метод определения нитритов с применением легкодоступных в отличие от других реагентов сульфаниламида и нафтиламина (Бикбулатов, 1977) обеспечивает наибольшую чувствительность анализа (минимальная определяемая концентрация 0.003 мг/дм³) и устойчивость азокрасителя во времени. Определению не мешают соли, растворенные в воде.

Нитраты. Для измерения содержания нитратов в природной воде используют фотометрические методы. Один из них основан на взаимодей-

ствии нитрат-ионов с салициловой кислотой и образованием желтого комплексного соединения. Метод предназначен для измерения массовых концентраций нитрат-ионов в диапазоне 0.1–10.0 мг/дм³. В случае превышения концентрации нитратов в анализируемой воде верхней границы диапазона допустимо разбавление пробы воды. Определению могут мешать взвешенные, окрашенные, органические вещества, хлориды >200 мг/дм³, нитриты более 2.0 мг/дм³, железо более 5.0 мг/дм³. Мешающее влияние устраняют специальной пробоподготовкой (ПНД Ф 14.1:2.4-95).

Второй – фотометрический метод с реактивом Грисса после восстановления нитратов до нитритов в кадмиевом редуторе. Этот метод более селективен и чувствителен. Предназначен для анализа проб воды с концентрацией нитратов 0.01–0.30 мг/дм³. При более высоких концентрациях нитратов в испытуемой воде также допустимо разбавление (РД 52.24.380-2006). После восстановления нитратов концентрация нитритов также может быть определена методом, предложенным Э.С. Бикбулатовым (1977).

Общий азот. В гидрохимической практике для определения общего азота наиболее распространены варианты метода Кьельдаля. В лаборатории ранее применяли персульфатный ампульный метод определения общего азота в природных водах (Гапеева и др., 1984) удобный для работы в полевых условиях, так как запаянные ампулы после окисления могут храниться длительное время. После окисления содержимое ампул количественно переносили в колбы для дальнейшего определения концентрации нитратов.

В настоящее время для окисления органического вещества до нитратов мы используем в стационарных условиях скороварку, в которую помещены колбочки с притертыми пробками, в которых находится проба с окислителем.

Фосфаты. Для измерения массовой концентрации фосфат-ионов применяют фотометрический метод, основанный на взаимодействии фосфат-ионов в кислой среде с молибдатом аммония и образованием фосфорно-молибденовой гетерополикислоты, которая восстанавливается аскорбиновой кислотой в присутствии сурьяно-виннокислого калия комплекса, окрашенного в голубой цвет (ПНД Ф 14.1:2.112-97). Методика предназначена для количественного химического анализа проб природных и очищенных сточных вод с определением фосфат-ионов при массовой концентрации от 0.05 до 1 мг/дм³ PO₄³⁻. Если массовая концентрация превышает верхнюю границу, то допускается разбавление пробы таким образом, чтобы концентрация фосфат-ионов соответствовала указанному диапазону. Мешающие влияния, обусловленные присутствием в пробе сульфидов, се-

роводорода, хроматов, арсенатов, нитритов и железа, устраняют специальной подготовкой пробы к анализу. Вместо аскорбиновой кислоты можно использовать хлористое олово, с которым получают более интенсивную, но менее устойчивую окраску голубого комплекса.

Общий фосфор. Концентрацию общего фосфора определяют фотометрическим методом после окисления персульфатом (ПНД Ф 14.1:2.106-97). Метод основан на окислении всех фосфорсодержащих соединений до ортофосфатов при кипячении пробы с персульфатом калия в кислой среде. Количество ортофосфатов определяют фотометрически (при длине волны 670–750 нм) по комплексу молибденовой сини. Диапазон измеряемых концентраций 0.04–0.40 мг/дм³. Количество органического азота, равно как и органического фосфора, рассчитывают по разности между общим содержанием и минеральной составляющей.

Железо и марганец. Для определения содержания железа и марганца предложено несколько различных методов, включая колориметрический и атомно-абсорбционный. Наиболее часто определение концентраций этих металлов проводят колориметрическими (фотометрическими методами), обеспечивающими простоту анализа и достаточную чувствительность.

Содержание железа определяли двумя методами – с роданистым калием и орто-фенантролином. Распространенный ранее метод с роданидом калия имел значительные ограничения при анализе вод с окрашенными гумусовыми соединениями и потому позднее был заменен методом с орто-фенантролином. В настоящее время в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ общее и растворенное железо в природной воде определяется фотометрическим методом с орто-фенантролином. Погрешность метода в диапазоне 0.1–1.0 мг/дм³ – 20 %. Принцип метода определения массовой концентрации общего железа основан на взаимодействии ионов Fe⁺² с о-фенантролином с образованием красного комплекса с максимумом светопоглощения при $\lambda=510$ нм. Восстановление Fe⁺³ до Fe⁺² проводят гидроксиламином. Окраска комплекса не зависит от pH в пределах 3–9 ед. pH и устойчива длительное время. Если массовая концентрация общего железа в анализируемой пробе превышает верхнюю границу, то допускается разбавление пробы таким образом, чтобы концентрация общего железа соответствовала регламентированному диапазону.

Мешающие влияния, обусловленные присутствием в пробе меди, кобальта, хрома, цинка в количествах, превышающих в 10 раз концентрацию железа, органических веществ, нитритов, полифосфатов и др. устраняются специальной подготовкой пробы (ПНД Ф 14.1:2.2-95). Растворенное железо определяется аналогично, но предварительно проба фильтруется через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. И уже

с фильтратом проводятся те же действия, что и с пробой при определении общего железа. Концентрация взвешенного железа вычисляется по разности между содержанием общего железа и растворенного.

Измерение массовой концентрации *марганца* в природной воде выполняют фотометрическим методом с персульфатом аммония (ПНД Ф 14.1:2.61-96). Диапазон измерений от 0.005 до 10 мг/дм³. Если массовая концентрация марганца в анализируемой пробе превышает 5 мг/дм³, пробу необходимо разбавлять. Если массовая концентрация марганца в анализируемой пробе ниже 0.05 мг/дм³, то пробу концентрируют путем упаривания.

Мешающие влияния, обусловленные присутствием в пробе органических веществ, хлорид-ионов и железа, устраняются специальной подготовкой пробы к анализу.

5.3.5. Загрязняющие вещества

Нефтепродукты. Для количественного определения нефтепродуктов в воде разработано множество методов, каждый из которых имеет свои ограничения. Выбор метода зависит от поставленных задач и возможностей лаборатории. При установлении качественного состава нефтепродуктов чаще используют хроматографические методы, при оценке суммарного содержания нефтепродуктов в воде более эффективны оптические методы (ИК-, УФ-спектрометрические и люминесцентные).

В течение многих лет в лаборатории применяли разработанный шведскими исследователями (Carlberg, Skarstedt, 1972) метод инфракрасной спектроскопии, базирующийся на избирательном поглощении ИК-излучения метильными и метиленовыми радикалами, которыми представлены основные группы углеводородов нефти (парафиновые и нафтеновые). В лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН разработана модификация этого метода, (Ершов, 1983; Синельников и др., 1973). Для фиксации спектров поглощения использовали инфракрасный спектрофотометр UR-20. С начала 2000-х годов и по настоящее время для измерения массовой концентрации нефтепродуктов в природной воде стали применять флуориметрический метод на анализаторе «Флюорат-02 М» (ПНД Ф 14.1:2:4.128-98). Метод основан на экстракции нефтепродуктов гексаном и измерении интенсивности флуоресценции экстракта на анализаторе «Флюорат-02 М», диапазон измерений 0.005–50 мг/дм³. Анализ необходимо выполнить в течение 3 ч после отбора проб, либо провести экстракцию нефтепродуктов. Гексановый экстракт можно хранить 1 не-

делю в условиях, исключаящих улетучивание растворителя. Флуориметрический метод позволяет также определить концентрацию фенолов, АПАВ, алюминия в воде.

Фенолы. Диапазон определяемых концентраций 0.0005–25 мг/дм³. Метод (ПНД Ф 14.1:2:4.182-02 основан на извлечении фенолов из воды бутилацетатом, экстракции их в водный раствор гидроксида натрия и измерении их содержания по интенсивности флуоресценции фенолов после подкисления экстракта. При анализе окрашенных, мутных вод и вод с большим содержанием органических веществ используют отгонку фенолов из пробы воды. После отбора пробу необходимо проанализировать в течение 8 часов, либо в течение 3 суток после консервации ее растворами фосфорной кислоты и сернокислой меди. Очевидно, что вне лаборатории анализ невозможен.

АПАВ. Метод измерений (ПНД Ф 14.1:2:4.158-2000) основан на экстракции хлороформом ионных пар анионных поверхностно-активных веществ с красителем акридиновым желтым из пробы с последующим измерением интенсивности флуоресценции экстракта на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Диапазон определяемых концентраций 0.025–100 мг/дм³. Анализ проб необходимо провести в течение суток, хранение до проведения анализа в холодильнике при температуре 2–8°C.

Алюминий. Метод измерений (ПНД Ф 14.1:2:4.181-02) основан на взаимодействии алюминия с люмогаллионом в среде ацетатного буфера с образованием флуоресцирующего комплекса в присутствии аскорбиновой кислоты и последующем измерении массовой концентрации алюминия на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Концентрация мешающих определению веществ в природной воде заметно ниже указанной в методике. Диапазон определяемых концентраций 0.01–50 мг/дм³.

Глава 6. Ученые лаборатории гидрологии и гидрохимии

Исследования гидрологического режима экосистем внутренних водоемов проводятся лабораторией гидрологии и гидрохимии уже более 65 лет. Весь путь научно-исследовательской деятельности укладывается в 5 этапов. Каждый этап характеризовался своеобразием, сложностью решаемых задач, оригинальностью и значимостью получаемых результатов, специфичностью научного руководства, научным составом профессионалов гидрологов и гидрохимиков. Подробные сведения о научной жизни лаборатории освещены в статье А.С. Литвинова и С.А. Поддубного «Лаборатории гидрологии и гидрохимии 60 лет», вышедшей в Трудах ИБВВ РАН (2016). За этот длительный период времени в лаборатории кроме современного состава проработало более 85 сотрудников, включая инженерный и лаборантский состав. Часть сотрудников приходила работать из других лабораторий, часть впоследствии переходила в лаборатории биологической направленности. Ниже мы приводим биографические сведения о научных сотрудниках лаборатории гидрологии и гидрохимии, внесших существенный вклад в изучение гидрологических процессов озер и водохранилищ СССР (России). Часть биографических сведений заимствована из литературных источников: «Наша гордость и память» (2006), Буторин Н.В. (1973), Кожара В.Л. (2021), «Книга Памяти» (2022).

В отдельные периоды времени лаборатория разделялась на лаборатории гидрологии и гидрохимии.

Заведующие лабораториями

ВСЕВОЛОД ИЛИОДОРОВИЧ РУТКОВСКИЙ
(1904–1972)

(заведующий лабораторией гидрологии с 1956 по 1962 гг.)
доктор сельскохозяйственных наук

Всеволод Илиодорович Рутковский родился 24 декабря 1904 г. в Ленинграде. Будучи студентом III курса Ленинградской лесотехнической академии, он работал в учебно-опытной партии сначала вычислителем, затем помощником таксатора и таксатором. В 1930 г. руководил лесным отрядом Юго-Осетинской экспедиции СОПС АН СССР. В 1931 г. В.И. Рутковский переходит на работу в Государственный гидрологический институт, где продолжает изучать влияние лесов на водный баланс и его элементы. Одновременно он интересовался вопросами районирования и



осуществил географо-гидрологическое районирование европейской части СССР и Закавказья. В 1939 г. Всеволод Илиодорович перешел на работу во Всесоюзный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, где руководил лесогидрологическими исследованиями на водоохранной зоне. В марте 1946 г. ему присвоена ученая степень кандидат географических наук.

В 1949 г. В.И. Рутковский защитил докторскую диссертацию в области гидрологии, в феврале 1950 г. ему присуждена ученая степень доктор сельскохозяйственных наук. До 1956 г. работал в МГУ на кафедре почвоведения, биолого-почвенном факультете. С 25 апреля 1956 г. В.И. Рутковский – первый официальный заведующий лабораторией гидрологии Института биологии водохранилищ АН СССР. Эта дата считается официальной датой создания лаборатории. В этот период круг его научных интересов был широк: занимался изучением водного баланса, кислородного и температурного режимов, изучением взаимосвязей растительных, почвенных грунтовых, поверхностных вод, климатических условий. В 1962 г. В.И. Рутковский перешел в Совет по проблемам водного хозяйства АН СССР, где он работал по 1968 г., занимаясь обоснованием методов определения эффективности комплексного освоения водных ресурсов.

Всеволод Илиодорович умело сочетал научную работу с активным участием в разработке различных мероприятий, способствующих рациональному использованию водных ресурсов. Он был председателем и членом многих межведомственных комиссий, неоднократно выполняя специальные задания министра лесного хозяйства СССР. Согласно приказу Министра лесного хозяйства № 592 от 5 ноября 1947 г. В.И. Рутковскому был вручен знак «Отличник социалистического соревнования Министерства лесного хозяйства СССР» № 72. Имел медали Советского Союза «За доблестный труд», «За трудовую доблесть», «В память 800-летия Москвы».



НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БУТОРИН

(1925–1988)

(заведующий лабораторией гидрологии с 1962 по 1988 гг.)
доктор географических наук

Николай Васильевич Буторин родился 9 мая 1925 г. в д. Прилуцкая Архангельской области. В январе 1943 г. был призван в ряды Советской Армии, и после окончания пехотного училища в г. Череповце, участвовал в боях на фронтах Великой Отечественной войны, командуя стрелковой ротой. В 1951 г. Окончил

Ленинградское высшее инженерно-морское училище им. адм. С.О. Макарова

и продолжил обучение в аспирантуре училища. После окончания аспирантуры он успешно защитил кандидатскую диссертацию «Вековые изменения среднего уровня Атлантического океана и их связь с циркуляцией атмосферы», которая была опубликована в виде монографии.

В 1955 г. по приглашению И.Д. Папанина Н.В. Буторин поступил на работу в Институт биологии внутренних вод АН СССР, с которым связана вся его дальнейшая научная жизнь. Начав трудовую деятельность в институте в должности младшего научного сотрудника, в октябре 1962 г. постановлением Бюро Отделения биологических наук АН СССР он был утвержден заведующим лабораторией гидрологии института, а в ноябре постановлением Президиума АН СССР – заместителем директора института, а в 1972 г. достиг высокого поста руководителя академического научного учреждения.

Н.В. Буторин как ученый, руководитель лаборатории и института внес большой вклад в развитие гидрологии, биологии и экологии пресных вод. В лаборатории периодически проводились годовые отчетные сессии, на которые приглашались специалисты из различных научно-исследовательских институтов и ведущих вузов страны и заслушивались не только отчеты сотрудников лаборатории, но и сообщения представителей других организаций. Им была создана и успешно развивалась теория водных масс водохранилищ, способствовавшая раскрытию связей между водными организмами и средой их обитания, выявлению зависимостей между структурно-функциональными характеристиками водных биоценозов и распределением абиотических параметров, а также оптимальных условий существования гидробионтов и путей управления их поведением и воспроизводством. Разработан новый метод выделения водных масс и дана детальная характеристика условий их формирования, трансформации и динамики. Развитое Н.В. Буториным и сотрудниками лаборатории учение о водных массах водохранилищ представляет собой фундамент, на котором базируются не только исследования Института биологии внутренних вод, но и других научно-исследовательских организаций, занимающихся исследованием экосистемы водохранилищ.

Наряду с научной деятельностью Николай Васильевич много сил отдавал организационной работе. В течение многих лет он был председателем Научного совета АН СССР по проблемам гидробиологии, ихтиологии и использования биологических ресурсов водоемов, председателем Секции водохранилищ Научного совета «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» ГКНТ СМ СССР, руководителем советской части проекта «Влияние загрязняющих веществ на водные организмы и экосистемы; разработка критериев качества воды» советско-американского сотрудничества

в области охраны окружающей среды, членом постоянного комитета по проблемам антропогенного эвтрофирования природных вод, членом Научного совета Комитета по системному анализу при Президиуме АН СССР, национальным представителем по проекту 18 КАПГ. Им проделана большая работа по организации совместных исследований по охране вод с учеными Англии, ГДР, Кубы, США.

За проявленное мужество в боях во время Великой отечественной войны Н.В. Буторин награжден орденом Александра Невского, двумя орденами Отечественной войны, двумя орденами Красной Звезды. За достигнутые институтом успехи в выполнении заданий по развитию науки и техники и внедрению результатов исследований в народное хозяйство Н.В. Буторин был награжден двумя орденами Трудового Красного Знамени.



АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ЛИТВИНОВ

(1939–2022)

(заведующий лабораторией гидрологии с 1994 по 2010 гг.)
доктор географических наук

Александр Сергеевич Литвинов родился 25 сентября 1939 г. в г. Ленинграде. В 1942 г. был эвакуирован вместе с мамой Марией Алексеевной в г. Алма-Ату, где находился до 1945 г. С мая 1945 г. проживал в г. Кишиневе, в 1956 г. окончил среднюю школу и затем поступил в Ленинградское Высшее Инженерно-морское училище им. адмирала С.О. Макарова. Учеба в вузе проходила очень интересно. Лекции читали известные преподаватели Ф.М. Кацман, И.В. Максимов, И.А. Блинов, Л.А. Иванов. Из воспоминаний Александра Сергеевича: «...Особенно запомнилась практика летом 1959 г., проходившая на экспедиционном судне «Экватор» в Северной Атлантике у берегов Норвегии и Исландии. Не раз в штормовых условиях студенты боролись за жизнь и побеждали».

В 1961 г. А.С. Литвинов с отличием закончил кафедру гидрологии Арктического факультета Ленинградского Инженерно-морского училища им. адмирала С.О. Макарова по специальности инженер-океанолог. Дипломную работу Александр Сергеевич выполнял в лаборатории гидрологии ИБВВ РАН и после ее успешной защиты в 1961 г. был принят в коллектив, где занимал должность старшего лаборанта, а с февраля 1964 г. – младшего научного сотрудника. А.С. Литвинов занимался анализом особенностей формирования, структуры, временной и пространственной изменчивости течений в Рыбинском водохранилище. В 1968 г. в Ленинград-

ском государственном университете он защитил кандидатскую диссертацию «Течения в Рыбинском водохранилище» по специальности гидрология суши. В 1976–1984 гг. под его руководством проводились исследования, связанные с территориальной переброской части стока северных рек в бассейн Волги.

А.С. Литвинов – ведущий ученый-исследователь водохранилищ Волжского каскада. Впервые для крупных водохранилищ при моделировании общей циркуляции вод им применен метод полных потоков и разработан новый метод расчета внутреннего водообмена, заложены основы изучения роли гидрологических процессов в распределении и перемещении гидробионтов. Также большое внимание уделялось роли абиотических факторов в функционировании водных экосистем и многолетней изменчивости гидрологических и гидробиологических характеристик. В 1980 г. после заполнения Чебоксарского водохранилища им были организованы экспедиции в первые годы становления водоема.

А.С. Литвинов был руководителем темы «Эксперимент Интеркосмос «Внутренние водоемы–87» на Рыбинском водохранилище. По проекту КАПГ проводились совместные работы и мероприятия с учеными Германии, Польши и Чехословакии. Большое внимание уделялось исследованию малых рек бассейна Рыбинского водохранилища. В 1999 г. в Пермском государственном университете А.С. Литвинов защитил докторскую диссертацию «Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада». Проводимые им исследования внесли весомый экспериментально-методический и теоретический вклад в структурную гидрологию и гидроэкологию.

В период с 2001 по 2014 г. был руководителем грантов РФФИ, проекта ФЦП «Разработка методологии оценки экологического состояния внутренних водоемов замедленного водообмена с целью создания научно-обоснованных технологий восстановления их ресурсного потенциала» (совместно с физическим факультетом МГУ). По итогам выполнения Государственного контракта в 2008 г. получены Диплом и медаль 2-ой Международной выставки «Перспективные технологи XXI века». Результаты многолетних исследований опубликованы более чем в 160 научных работах.

А.С. Литвинов наряду с научной вел большую научно-организационную и общественную работу. В течение многих лет был ученым секретарем Секции водохранилищ Научного совета «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» ГКНТ СМ СССР, потом председателем этой секции. Он неоднократно принимал участие в крупных международных совещаниях и симпозиумах за рубежом. С 1994 по 1998 гг. исполнял обязанности зам. директора ИБВВ РАН по общим вопросам. Награжден юбилейной медалью «300 лет Российскому флоту», Почетной грамотой «275 лет образованию

Российской Академии наук». В ноябре 2010 г. ему присуждена премия И.Д. Папанина в области изучения внутренних вод.



ЮРИЙ ЭДУАРДОВИЧ ТИТОВ

(заведующий лабораторией гидрологии с 1991 по 1994 гг.)
кандидат географических наук

Юрий Эдуардович Титов родился 11 апреля 1951 г. в г. Ленинграде. В 1975 г. окончил океанологический факультет Ленинградского гидрометеорологического института по специальности инженер-океанолог. Работал ст.н.с. в НИС ЛГМИ. Занимался диагнозом и прогнозом океанологических процессов. На эту тему совместно с Н.П. Смирновым и П.А. Вайнов-

ским подготовлена монография «Статистический диагноз и прогноз океанологических процессов». Автор 29 научных работ. В 1987 г. защищена диссертация на соискание степени кандидата географических наук. С 21 мая 1990 г. прошел по конкурсу в ИБВВ РАН на должность ст.н.с. В 1991 г. в связи с реорганизацией структуры Института и образованием отдела абиотических факторов среды был назначен на должность заведующего лабораторией гидрологии. В июле 1994 г. уволился по собственному желанию.



СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ ДРАЧЕВ

(1898–1974)

(заведующий лабораторией
гидрохимии с 1963 по 1974 гг.)
доктор биологических наук, профессор

Сергей Михайлович Драчев родился 8 декабря 1898 г. в с. Лебяжье озеро Воронежской области. Высшее образование получил на физико-математическом факультете Харьковского университета и в Институте сельского хозяйства и мелиорации, который закончил по специальности агрономическая химия.

С 1920 по 1929 г. Сергей Михайлович работал в Тимирязевской сельскохозяйственной академии на кафедре общего земледелия в должности научного сотрудника и преподавателя. Работая под руководством проф. А.Г. Дояренко, он участвовал в разработке теоретических обоснований рациональных приемов обработки почв и воздействия их на все факторы жизни растений. В частности, им изучались мобильность почвенных

фосфатов, растворимость твердой фазы почв и их поглотительная способность. В 1929 г. С.М. Драчев поступил на работу в Московский научно-исследовательский санитарный институт им. Ф.Ф. Эрисмана.

В середине 1940-х годов по приглашению дейст. члена АМН СССР А.Н. Сысина Сергей Михайлович переходит в Институт общей и коммунальной гигиены АМН СССР на должность заведующего лабораторией гигиены питьевых вод. Основное направление исследований – разработка научного обоснования санитарных требований по охране водоемов различных видов водопользования для разных санитарных и климатических условий. При непосредственном участии С.М. Драчева разрабатывались законодательные и организационные мероприятия по охране источников водоснабжения в масштабах всей страны. В 1951 г. С.М. Драчев защитил докторскую диссертацию, вскоре ему было присвоено звание профессора.

В сентябре 1963 г. С.М. Драчев возглавил гидрохимическую лабораторию Института биологии внутренних вод АН СССР, где и проработал до конца жизни. На основе большого опыта работы и понимания важности биологических процессов в формировании качества воды он пришел к убеждению, что в отношении поверхностных вод «гидрохимия» как дисциплина должна будет превращаться в «биогеохимию». Под руководством и при участии С.М. Драчева работы в этом направлении были продолжены на водохранилищах Волжского каскада и реках его бассейна. Была установлена общая закономерность изменения основного солевого состава кальциево-карбонатных природных вод под воздействием бытовых и промышленных сточных вод. Большие исследования были посвящены вопросам, связанным с загрязнением и процессами самоочищения от нефтепродуктов, разработан метод определения битумоидов.

По инициативе Сергея Михайловича организовано первое Всесоюзное совещание по вопросам исследования биогенных элементов и органического вещества во внутренних водоемах (Борок, 1969 г.). О масштабах научной и научно-практической деятельности С.М. Драчева свидетельствует его участие в работе научных и научно-директивных организациях страны. Он был членом Научного совета ЛН СССР по проблемам биосферы, членом комиссии АН СССР по разработке проблем охраны природных вод, членом Государственного комитета Совета министров СССР по науке и технике. Сергей Михайлович – консультант Всемирной организации здравоохранения, член редколлегии международного журнала «Air and Water Pollution».



ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ ЛЕБЕДЕВ

(заведующий лабораторией
гидрохимии с 1995 по 1997 гг.)
доктор биологических наук

Юрий Михайлович родился в 1937 г. в г. Москве. После окончания средней школы в 1954 г. он поступил на факультет ихтиологии и рыбоводства Московского РыбВТУЗа, окончив который, несколько лет работал в научно-исследовательских организациях Минрыбхоза СССР. Затем был зачислен в аспирантуру ВНИИПРХа по специальности «гидробиология».

С декабря 1966 г. Юрий Михайлович преподавал на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Здесь в 1969 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию по теме «Круговорот азота в удобряемых рыбоводных прудах». В 1972 г. был принят на работу в Тихоокеанский институт географии ДВНЦ АН СССР в г. Хабаровске на должность заведующего лабораторией гидробиологии. Успешно сочетая в себе знания математики и биологии, с 1981 г. Юрий Михайлович работал в вычислительном центре ДВНЦ в должности старшего научного сотрудника.

В 1985 г. Ю.М. Лебедев приехал в пос. Борок, где руководил исследованиями по теме «Научные основы гидробиологического прогнозирования» в Институте биологии внутренних вод АН СССР. Разработал количественную модель прогнозирования качества воды в проектируемых водохранилищах. Выполненные согласно этой модели расчеты для Вазузской гидросистемы и Зейского водохранилища в дальнейшем подтвердили ее высокую прогностическую ценность и во многом оправдались.

Плодотворно работая в ИБВВ АН СССР, в 1989 г. Ю.М. Лебедев защитил докторскую диссертацию на тему «Биотический баланс водотоков и его изменение в результате зарегулирования стока», которая стала обобщением материалов его собственных многочисленных экспедиционных исследований и мировой литературы в области изучения закономерностей функционирования и формирования продуктивности в проточных водных экосистемах. В 1991–1992 гг. Ю.М. Лебедев издал методическое руководство по оценке качества воды в реках, обзор и рекомендации по поддержанию режима болот, разработал математические модели речных экосистем. В 1992 г. Юрием Михайловичем опубликован оригинальный вариант концепции охраны вод России, а затем при его участии разработан окончательный концептуальный документ, впоследствии утвержденный правительством России.

Отличительной особенностью Юрия Михайловича была его многосторонняя энциклопедическая образованность, притягательность как человека и ученого. Он одинаково хорошо разбирался в современной и традиционной живописи, литературе и поэзии, был лично знаком со многими из известных деятелей культуры. Своими знаниями и опытом Ю.М. Лебедев щедро делился со студенческой молодежью и своими многочисленными учениками и последователями. В течение многих лет он читал курс лекций «биогеография» на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова и «санитарная гидробиология» на биологическом факультете Дальневосточного государственного университета, «водные экосистемы» – на факультете экологии Тверского государственного университета. Много сил и времени Юрий Михайлович отдавал подготовке научных кадров, успешно руководил аспирантами и соискателями. Под его руководством защищено пять кандидатских диссертаций, опубликовано более 70 научных работ.

Ю.М. Лебедев широко известен в России и за ее пределами как ученый, внесший большой вклад в развитие продукционного направления в гидробиологии, старавшийся воплотить результаты фундаментальных научных исследований в практику. Для работ Юрия Михайловича характерен комплексный подход к исследованию процессов в связи с гидрохимическими и гидробиологическими особенностями водоемов, чему в немалой степени способствовало широкое и умелое использование математических методов. В нем сочетались качества теоретика, экспериментатора, аналитика и полевика. Он всегда поражал окружающих своей широкой эрудицией, независимостью суждений, очень много и самозабвенно работал, не щадя здоровья ради дела, которому до последнего часа посвятил свою жизнь (по материалам воспоминаний В.Г. Девяткина и Н.М. Шиховой, 2002).

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ОСИПОВ

(1951–2023)

(заведующий лабораторией
гидрохимии с 1991 по 1995 гг.)
кандидат химических наук

Николай Николаевич Осипов родился 30.03. 1951 г. в г. Ленинграде. В 1973 г. окончил океанологический факультет Ленинградского гидрометеорологического института по специальности инженер-океанолог. В 1982 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата химических наук. В 1987 г. присвоено звание доцента. В августе 1991 г. прошел по конкурсу на заведующего лабораторией гидрохимии ИБВВ РАН. 1.09.1995 г. уволился по собственному желанию.



Научные сотрудники лабораторий



АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КРЕНКЕ

(1931–2014)

доктор географических наук, профессор,
лауреат Государственной премии

Александр Николаевич Кренке родился 8 октября 1931 г. в г. Москве. В 1954 г. окончил географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности географ-гидролог. Свою трудовую деятельность начал в 1954 г. на Биостанции в Борке (Ярославская область) под руководством И.Д. Папанина. Занимался исследованием течений в Рыбинском водохранилище. В лаборатории гидрологии и гидрохимии проработал до ноября 1956 г.

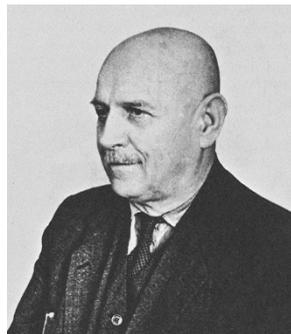
В 1957 г., уже как сотрудник Института географии АН СССР, он принял участие в одной из наиболее продолжительных экспедиций (1957–1959 гг.) на Земле Франца-Иосифа, результаты которой положили начало его научной деятельности, новым фундаментальным идеям в области гляциологии и созданию нового направления в науке – гляциогидроклиматологии. Разработанная им в 1960–1970-е годы концепция ледниковых систем легла в основу множества каталогов, монографий, карт Атласа снежно-ледовых ресурсов, что выдвинуло его в число ведущих специалистов по гляциологии и в России, и в мире. В 1964 г. А.Н. Кренке защитил кандидатскую, а в 1981 г. – докторскую диссертации. В 1982 г. вышла его знаменитая монография «Массообмен в ледниковых системах на территории СССР». А.Н. Кренке участвовал в многочисленных экспедициях и экспериментах в пределах России и за рубежом. С 1983 г. Александр Николаевич Кренке возглавлял лабораторию климатологии. В последние годы им разработана методика оценки изменения границы питания в ледниковых системах, получены актуальные научные результаты о пределах роста снежности при потеплении. А.Н. Кренке опубликовано сотни статей, несколько монографий.

Талант и научные достижения Александра Николаевича не остались не оцененными: он получил звание лауреата Государственной премии за 2001 г. за участие в создании Атласа снежно-ледовых ресурсов мира, а также звание лауреата премии ГУГК им. Красовского и почетного члена Русского географического общества (по материалам журнала Известия РАН. Серия географическая, 2014, № 3, с. 115).

МИХАИЛ АЛЕКСЕЕВИЧ ФОРТУНАТОВ

(1899–1984)

доктор биологических наук



Михаил Алексеевич Фортунатов родился 7 декабря 1899 г. в г. Киеве. В 1917 г. поступил в Петровско-Разумовскую Академию (ныне Академия им. К.А. Тимирязева) на агрономическое отделение, а впоследствии перешел на отделение рыбоведения. После окончания Академии в 1923 г. М.А. Фортунатов в течение ряда лет работал в Керченской ихтиологической лаборатории, а с декабря 1923 до июня 1931 г. работал на оз. Севан. Вначале заведовал Севанской ихтиологической станцией, затем был директором Севанской озерной станции. Здесь, кроме экспедиционной деятельности на многих озерах Армении, Грузии и Азербайджана, проводились комплексные лимнологические исследования и акклиматизации ладожского сига и севанской форели в оз. Иссык-Куль.

В 1931 г. Михаил Алексеевич перешел на работу в Москву, в Центральный институт рыбного хозяйства (ВНИРО), откуда в 1932 г. был направлен в Петропавловск-Камчатский для организации Камчатского отделения Тихоокеанского института рыбного хозяйства (ТИНРО). В 1945–1946 гг. работал заведующим лабораторией на нефтяных промыслах в районе реки Яранги близ г. Ухты, а с 1946 г. проводил лимнологические исследования на Аральском море, озерах и в дельтах рек Сыр-Дарья и Аму-Дарья в экспедициях, организованных Институтом озероведения АН СССР. В мае 1956 г. М.А. Фортунатов был приглашен И.Д. Папаниным на должность научного сотрудника на биологическую станцию «Борок», которая в этом же году была преобразована в Институт биологии водохранилищ. В 1961 г. ему была присуждена ученая степень доктора биологических наук без защиты диссертации.

М.А. Фортунатов систематически участвовал в экспедиционных рейсах по Волге от ее истоков до устья, много внимания уделял изучению природы волжских водохранилищ и озер Верхней Волги. Большую известность получили его работы по изучению цветности и прозрачности воды внутренних водоемов, их типизации и классификации, а также районировании Волги. Много внимания уделял научно-организационной деятельности. Он был одним из организаторов научных конференций «Волга-1» (г. Тольятти, 1968 г.) и «Волга-2» (г. Пермь, 1974 г.). Как признанный в мире лимнолог, был одним из организаторов и членом президиума ХУШ лимнологического конгресса, состоявшегося в 1971 г. в г. Ленинграде.

Им же были разработаны маршруты научных экскурсий для участников конгресса по озерам Ярославской области и историческим местам. Михаил Алексеевич тесно контактировал с Ярославским отделением географического общества и организовал ячейку общества в Институте биологии внутренних вод АН СССР. Как видный лимнолог, ландшафтовед, прекрасный оратор и человек, обладающий обширной научной эрудицией, он неоднократно выступал перед студентами-географами Ярославского педагогического института и на совместных заседаниях Ярославского отделения ГО и музея заповедника.

Много лет своей научной деятельности М.А. Фортунатов отдал сбору и обобщению материалов по крупнейшим плотинам и водохранилищам мира, первые сводки по которым были опубликованы в 1962 и 1963 гг. В 1979 г. в первую монографию «Водоохранилища мира» им была написана вводная глава «Общая характеристика водохранилищ мира», а в 1980 г. В «Известиях географического общества» публикуется проблемная статья «Водоохранилища мира и их типизация». За активную деятельность в области пропаганды географических знаний М.А. Фортунатов был награжден Президиумом Географического общества СССР Почетной грамотой.



КОНСТАНТИН КОНСТАНТИНОВИЧ
ЭДЕЛЬШТЕЙН

доктор географических наук, профессор

Константин Константинович Эдельштейн родился 4 октября 1935 г. в г. Москве. В 1958 г. окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова географический факультет по специальности географ-гидролог. В августе 1958 г. Константин Константинович вместе с Мариной Григорьевной Ершовой поступили на работу в лабораторию гидрологии ИБВВ СССР на должность ст. лаборанта. Работал по теме «Динамика водных масс водохранилищ». Константин Константинович поступил в аспирантуру Института биологии водохранилищ АН СССР. Его руководителем был известный лимнолог, д.г.н., проф. Б.Б. Богословский. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию «Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища».

С 1966 г. К.К. Эдельштейн работает на кафедре гидрология суши МГУ. Он руководит комплексными исследованиями Красновидовской лаборатории водохранилищ при кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ на Можайском гидрологическом полигоне в Подмосковье

и других регионах России. В 1983 г. К.К. Эдельштейн защитил докторскую диссертацию «Морфология, водный режим и гидрологическая структура долинных водохранилищ». В 1984 г. ему присвоено звание «профессор».

Основные направления научной работы – оценка состояния водных и биологических ресурсов водохранилищ, прогнозирование качества воды в водохранилищах. Константин Константинович – один из ведущих гидрологов России, крупнейший специалист в области гидроэкологии озер и водохранилищ. К.К. Эдельштейн ведет большую педагогическую работу, читает курс лекций по учебным курсам «Гидрология озер и водохранилищ», «Лимнологическое моделирование», «Гидрология материков».

Годы работы в лаборатории 01.08.1958 г. – 19.11.1966 г.

БОРИС АЛЕКСАНДРОВИЧ СКОПИНЦЕВ

(1902–1989)

доктор химических наук



Борис Александрович Скопинцев родился 8 августа 1902 г. в Москве. В 1921 г. поступил на естественное отделение физико-математического факультета Московского государственного университета, которое закончил в 1929 г. По специальности агрономическая химия. Одновременно работал до 1924 г. счетоводом Мособлздравотдела, затем библиотекарем в семинарской библиотеке Московского университета. С 1925 г. учебу совмещал с работой сначала в почвенной, а затем в гидрохимической лабораториях Московского санитарного института им. Ф.Ф. Эрисмана. Во главе гидрохимической лаборатории Санитарного института в те годы стоял будущий основоположник российской химической океанологии С.В. Бруевич. С этого времени началось их многолетнее сотрудничество по исследованию химии пресных, а затем морских и океанских вод. После окончания МГУ Борис Александрович работу в Санитарном институте стал совмещать с работой сначала в плавучем Морском институте, в последующем – во Всесоюзном научно-исследовательском институте морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). В 1935 г. без защиты диссертации Б.А. Скопинцеву была присуждена ученая степень кандидата химических наук.

В июле 1941 г. в связи с эвакуацией ВНИРО из Москвы в г. Астрахань был переведен в Морской отдел Московской группы Государственного гидрологического института. В октябре 1943 г. Морской отдел ГГИ был преобразован в Государственный океанографический институт

(ГОИН), в котором Борис Александрович занял должность старшего научного сотрудника, а затем начальника лаборатории химии моря и проработал до декабря 1952 г. В 1949 г. он защитил докторскую диссертацию «Органическое вещество в природных водах». В марте 1952 г. был утвержден в звании профессора, с 1975 г. – заслуженный деятель науки РСФСР. Последующие 14 лет жизни отданы работе в Морском гидрофизическом институте АН СССР сначала в Москве, а с 1964 г. – в Севастополе. В 1966 г. принял приглашение И.Д. Папанина перейти на постоянную работу в Институт биологии внутренних вод АН СССР, где он, начиная с 1961 г., консультировал сотрудников гидрохимической лаборатории. Здесь Борис Александрович трудился около 20 лет.

С именем Б.А. Скопинцева неразрывно связано становление и развитие химической океанологии в нашей стране. Магистральным направлением его научной деятельности было исследование органического вещества природных вод, и в этой области он, безусловно, – крупнейший авторитет с мировым именем. Его подходы в изучении органического вещества намного опережали свое время. Он разработал новый – балансовый способ оценки концентраций и «возраста» водного гумуса, провел экспериментальные работы по скорости трансформации органического вещества и регенерации биогенных элементов в аэробных и анаэробных условиях. Особый интерес представляют его оценки баланса органического вещества в Мировом океане и критические обзоры по достижениям в исследованиях состава органического вещества морских и океанских вод. Его монография «Органическое вещество в природных водах (водный гумус)» (1950 г.) на многие годы стала настольной книгой каждого гидрохимика-органика. Помимо широко известных трудов по химии морей и океанов, Б.А. Скопинцев сделал большой вклад в составление морских грунтовых карт и карт течений на Дальнем Востоке (1942–1944 гг.), которые сыграли важную роль в проводке судов на этом театре военных действий во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг.

Б.А. Скопинцев постоянно уделял внимание методологическим и методическим вопросам химического анализа, созданию методов и их совершенствованию. Участник и организатор многочисленных экспедиций на реки, озера, водохранилища, моря и океаны. Участник многих международных и всесоюзных форумов по проблемам исследований природных вод (пресных и морских). Несмотря на напряженную научную деятельность, Борис Александрович много сил отдавал организационной работе. В разные годы он возглавлял или входил в состав комиссий различных государственных и международных организаций и учреждений. В течение многих лет был членом редколлегии журнала «Океанология».

Б.А. Скопинцев награжден высшей наградой СССР – орденом Ленина (1951 г.) и медалями: «За победу над Германией» (1945 г.), «В память 800-летия Москвы» (1948 г.), «Двадцать лет победы в Великой Отечественной войне» (1965 г.).

НИКОЛАЙ ПАВЛОВИЧ СМИРНОВ

доктор географических наук, профессор

Николай Павлович Смирнов родился 18 января 1937 г. в д. Кужелькино Бологовского района Калининградской области. В 1959 г. окончил Ленинградский Гидрометеорологический институт по специальности инженер-океанолог. По окончании института работал инструктором ЛГК ВЛКСМ. В июне 1960 г. перешел на работу по специальности в Северо-Западное аэрогеофизическое предприятие, затем с июня 1961 г. – в научно-исследовательский сектор Ленинградского высшего Инженерно-морского училища. После окончания аспирантуры в декабре 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию.



С января 1966 г. Николай Павлович работал в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), участвовал в научных исследованиях на дрейфующей станции СП-15. С 1967 по 1974 г. работал в лаборатории гидрологии ИБВВ АН СССР. С приходом Николая Павловича Смирнова в лаборатории появилось новое направление – исследование влияния космо-геофизических факторов на колебания стока Волги. В 1974 г. Н.П. Смирнов вернулся в г. Ленинград в ААНИИ на должность руководителя отдела. В этот период в полной мере проявились его способности как руководителя и организатора научных и экспедиционных исследований. В 1978 г. Н.П. Смирнов защитил докторскую диссертацию, 24 июля 1984 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре океанологии. В 1980 г. назначен ректором Ленинградского гидрометеорологического института.

С октября 1988 по февраль 1994 г. занимал пост директора ИБВВ РАН СССР. Область научных интересов Н.П. Смирнова – исследования многолетних колебаний стока Волги (причины, тенденции, закономерности, зависимости, прогноз). Методы многомерного статистического анализа, классификация и районирование.



ЭДУАРД ИОСИФОВИЧ САРУХАНЯН

доктор географических наук

Эдуард Иосифович Саруханян родился 24 июня 1940 г. в г. Новороссийск Краснодарского края. В 1957 г. поступил на арктический факультет Ленинградского высшего инженерного морского училища (ЛВИМУ) им. адмирала С.О. Макарова, окончив его с отличием в 1962 г. по специальности «инженер-океанолог». По распределению Э.И. Саруханян был направлен на работу на должность младшего научного сотрудника в арктическую научно-исследовательскую лабораторию в пос. Тикси Якутской АССР. В 1965 г. Эдуард Иосифович поступил в аспирантуру на кафедру гидрологии моря ЛВИМУ, которую окончил в декабре 1967 г. В январе 1968 г. Э.И. Саруханян защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук по теме «Полюсный прилив в Мировом океане».

С декабря 1967 по август 1969 г. Э.И. Саруханян работал младшим научным сотрудником в институте биологии внутренних вод АН СССР. Одним из результатов этой работы стала монография, написанная им совместно с Н.П. Смирновым, посвященная изучению причин многолетней изменчивости стока Волги.

С сентября 1969 г. трудовая деятельность Э.И. Саруханяна связана с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) в Ленинграде. В 1981 г. защитил диссертацию «Крупномасштабная динамика вод Южного океана» на соискание ученой степени доктора географических наук. В последние годы работы, благодаря своему опыту в организации крупных наблюдательских программ, он являлся специальным советником Генерального секретаря ВМО по Международному Полярному Году (МПГ) 2007–2008 и членом Объединенного комитета по МПГ. Э.И. Саруханян является автором и соавтором более 150 научных работ, в том числе восьми монографий и четырех научно-популярных книг¹.

¹ https://ru.wikipedia.org/wiki/Саруханян_Эдуард_Иосифович

СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ РАЗГУЛИН

доктор биологических наук

Сергей Михайлович Разгулин родился 21 января 1952 г. в г. Рыбинске. В 1975 г. окончил Ярославский государственный педагогический институт им. К.Д. Ушинского (ЯГПИ) по специальности география и биология. В 1977 г. работал в школе, учителем географии в г. Рыбинске. В 1978 г. С.М. Разгулин поступил на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии в группу М.В. Гапеевой. Область научных интересов – трансформация биогенных элементов и органического вещества в водоемах. В 1985 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию «Баланс биогенных элементов в Рыбинском водохранилище и прогноз изменения их концентраций при территориальном перераспределении стока северных рек» по специальности гидрохимия.



С 1987 по 1988 г. Сергей Михайлович работал ассистентом на кафедре физической географии ЯГПИ, а затем старшим научным сотрудником в Институте лесоведения РАН, где в настоящее время занимается исследованием цикла азота в лесу. В 2017 г. защитил докторскую диссертацию «Цикл азота в экосистемах березовых лесов южной тайги европейской части России» по специальности экология.

Годы работы в лаборатории – с 1978 г. по май 1987 г.

НИНА АЛЕКСАНДРОВНА ТРИФОНОВА

(1931–2019)

кандидат географических наук

Нина Александровна Трифонова родилась 4 июня 1931 г. в Смоленской области. Окончила Ленинградский государственный педагогический институт им. А.И. Герцена, факультет естествознания по специальности учитель химии и биологии.

Н.А. Трифонова проводила гидрохимические исследования водохранилищ Волги. Ею обобщены результаты по активности содержащихся в воде ферментов фосфатазной группы, обеспечивающих водным организмам возможность использовать в качестве источника усвояемых форм фосфора его органические соединения. Занималась изучением кинетики энзимных процессов для оценки скорости трансформации и поглощения соединений азота водными организмами. Разработала методику определения общего азота в воде.



В 1974 г. в МГУ защитила кандидатскую диссертацию «Соединения азота в Рыбинском водохранилище». Трифонова Нина Александровна работала в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН с августа 1955 г. по октябрь 1990 г.



НИНА АЛЕКСАНДРОВНА ЗИМИНОВА

(1935–2020)

кандидат географических наук

Нина Александровна Зиминова родилась 2 февраля 1935 г. в г. Сыктывкаре. В 1952 г., окончив школу с золотой медалью, она поступила на географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В 1957 г. с отличием закончила обучение по специальности гидрология и была направлена по распределению на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии Института биологии водохранилищ АН СССР.

В 1959 г. Нина Александровна поступила в аспирантуру и в 1964 г. На географическом факультете МГУ успешно защитила кандидатскую диссертацию «Водные взвеси Рыбинского водохранилища». С 1959 г. Н.А. Зиминова проводила исследования водных взвесей волжских водохранилищ. Ею выявлены основные закономерности временных и пространственных изменений состава и количества взвесей водохранилищ Верхней Волги. Даны количественная оценка компонентов баланса взвешенных веществ в этих водоемах и количественная характеристика трансформации стока речных наносов при регулировании водного стока.

В 1975–1979 гг. Нина Александровна занималась исследованиями одного из важнейших факторов круговорота веществ в водоемах – аккумуляции органического вещества и биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ. В результате работы выявлены закономерности пространственно-временного распределения биогенных элементов в донных отложениях, рассчитаны общий запас биогенов и среднегодовые скорости их аккумуляции. Для оценки биогеностойчивости водохранилищ составлены среднегодовые балансы биогенов, позволившие выявить роль отдельных источников в обогащении водоемов биогенными элементами.

В 1980–1994 гг. Н.А. Зиминова занимала должность ученого секретаря в Институте биологии внутренних вод. Это потребовало значительных сил для ведения работ по подготовке планов научных исследований и отчетов, организации деятельности Ученого совета, аспирантуры, канце-

лярии, машинописного бюро и архива. С 1995 г. деятельность Нины Александровны была связана с журналом «Биология внутренних вод». Продуманная и профессионально организованная работа коллектива издательского отдела под руководством Нины Александровны способствовала тому, что журнал приобрел широкую известность среди научной общест-венности России и стран СНГ. Благодаря этому в 2000 г. Российская ака-демия наук вошла в число учредителей журнала, и он стал академическим.

В 2007 г. Нина Александровна провела большую работу по организа-ции издания английской версии журнала в проекте Pleiades-Springer – со-ставление информационных данных о журнале, его паспортизация, органи-зация рецензий на журнал и поддержки его авторитетными отечественными и зарубежными учеными. Журнал успешно прошел конкурс и был принят в программу Pleiades-Springer. С 2008 г. компания «Pleiades Publishing» из-дает его английскую версию.

ФЕРДИНАНД ИОГАНОВИЧ БЕЗЛЕР

(1903–1971)

кандидат биологических наук



Фердинанд Иоганович Безлер родился в 1903 г. в дер. Термичи, Крым. В 1925 г. окон-чил естественное отделение физико-математи-ческого факультета Крымского государствен-ного университета им. М.В. Фрунзе в г. Симфе-рополе. В 1926 г. поступил в аспирантуру НИИ зоологии 1-го Московского университета.

В 1929–1931 гг. занимался гидрохимическими и гидробиологическими исследованиями на Глубокоозерской гидробиологической станции. В 1934–1937 гг. Ф.И. Безлер работал в Институте экспериментальной био-логии Наркомздрава РСФСР. В 1936 г. ему была присуждена степень кан-дидата биологических наук. В 1941 г. как немец был выслан с семьей в Ка-рагандинскую область Казахской ССР. В начале 1942 г. был мобилизован в трудовую армию на лесозаготовки, где занимался, в частности, химиче-ской переработкой отходов лесной промышленности. В январе 1946 г. де-мобилизован по состоянию здоровья. Оставался в Казахстане до конца 1957 г. Здесь Ф.И. Безлер в составе геологической службы был руководи-телем и методистом группы гидрохимических исследований.

В лаборатории Ф.И. Безлер проработал 12 лет (1958–1970). Занимался изучением гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги, рабо-

тал по теме «Баланс общего азота в воде Рыбинского водохранилища», «Антропогенные факторы химического состава воды». В последние годы работал над Справочником по водным ресурсам СССР.



МАРИНА ГРИГОРЬЕВНА ЕРШОВА

кандидат географических наук

Марина Григорьевна Ершова родилась 20 октября 1935 г. в г. Москве. В 1958 г. окончила Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова географический факультет по специальности географ-гидролог. С февраля 1959 г. – старший лаборант лаборатории гидрологии ИБВВ АН СССР, с 28 декабря 1964 г. – младший научный сотрудник. Марина Григорьевна

за время работы в лаборатории участвовала в многочисленных экспедициях на водохранилища Волги, принимала участие в экспериментальных работах.

С 1966 г. М.Г. Ершова работает на кафедре гидрология суши МГУ. В 1971 г. защитила кандидатскую диссертацию «Динамика водных масс малых водохранилищ (на примере Можайского водохранилища)». Область научных интересов – гидрология озер и водохранилищ, динамика водных масс, моделирование гидрологической структуры водоемов. Годы работы в лаборатории – с января 1959 г. по ноябрь 1966 г. Награждена медалями «Ветеран труда», «250 лет Московского Университета».



ОЛЬГА ФЕДОРОВНА КОНДРАЦОВА

(1929–2011)

кандидат географических наук

Ольга Федоровна Кондрацова родилась 10 февраля 1929 г. в дер. Покровка Джетысуйского района Алма-Атинской области. В 1951 г. окончила Одесский гидрометеорологический институт по специальности инженер-океанолог. После окончания института Ольга Федоровна работала на Мурманском биостанции АН СССР

(пос. Дальние Зеленцы), которая в 1958 г. была реорганизована в Мурманский морской биологический институт (ММБИ). С ноября 1962 г. по май 1986 г. О.Ф. Кондрацова работала в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН. Затем стала заведующей музеем И.Д. Папанина, где проработала по сентябрь 2006 г.

В 1974 г. Кондрацова О.Ф. защитила кандидатскую диссертацию «Квазидвухлетний цикл в колебаниях стока рек СССР» по специальности гидрология суши в Пермском государственном университете. Занималась разработкой вопросов, связанных с многолетними колебаниями стока рек СССР, подробно изучила временные составляющие в изменчивости речного стока, выявила особенности в колебаниях стока рек ЕТС.

ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ СИНЕЛЬНИКОВ

(1926–1979)

кандидат медицинских наук

Владимир Евгеньевич Синельников родился 4 мая 1926 г. в г. Одесса Украинской ССР. Окончил Киевский медицинский Институт, лечебный факультет и Центральный Институт усовершенствования врачей по специальности радиационная гигиена. С мая 1944 г. по ноябрь 1945 г. Владимир Евгеньевич находился в действующей армии 2-го Белорусского и 3-го Прибалтийского фронтов. Прошел путь из Белоруссии (июль 1944 г.) до Берлина (апрель 1945 г.), затем г. Прага (май 1945 г.), г. Кенигсберг (июль–август 1945 г.) и Монголия (август 1945 г.).



В.Е. Синельников – кандидат медицинских наук. Область научных интересов – занимался вопросами, связанными с загрязнением и процессами очищения от нефтепродуктов. Разработал метод определения битумоидов в воде и донных отложениях волжских водохранилищ. В.Е. Синельников награжден медалями «За отвагу», «За взятие Кенигсберга», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и орденом Отечественной войны II степени.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии работал с января 1963 г. по январь 1979 г.

НИНА АЛЕКСАНДРОВНА КУДРЯВЦЕВА

кандидат географических наук

Нина Александровна Кудрявцева родилась 1 января 1939 г. в с. Фролово, Буденовского р-на, Приморского края. В 1965 г. Окончила Московский областной медицинский Институт им. Н.К. Крупской (химик-биолог).

В 1974 г. в Пермском государственном университете Н.А. Кудрявцева защитила кандидатскую диссертацию «Влияние антропогенных



факторов на химический состав водоемов бассейна Верхней и Средней Волги» по специальности гидрохимия. Занималась изучением деструкции органического вещества и минеральных компонентов в высших водных растениях в микроанаэробных условиях. Изучала формы фосфора в донных отложениях водохранилищ Волги и Камы.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР работала с октября 1963 г. по август 1981 г.



АЛЛА АЛЕКСАНДРОВНА БЫЛИНКИНА

(1924–2019)

кандидат биологических наук

Алла Александровна Былинкина окончила биологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности гидробиология. Занималась изучением характеристик гидрохимического режима волжских водохранилищ, в связи с их морфологией и гидрологией и влиянием загрязнений. В совместных исследованиях сотрудников лаборатории гидрохимии была установлена общая закономерность изменения солевого состава кальциево-карбонатных природных вод под воздействием бытовых и промышленных сточных вод. Особое внимание уделяла изучению процессов круговорота биогенных элементов и проблеме антропогенного евтрофирования. В последние годы А.А. Былинкина работала по теме: «Влияние современных антропогенных факторов на изменение химических свойств воды в условиях естественного (незарегулированного) и регулируемого стока реки».

В лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН работала с января 1965 г. по сентябрь 2006 г.



ВЛАДИМИР ЛЕОНИДОВИЧ КОЖАРА

(1934–2018)

кандидат географических наук

Владимир Леонидович Кожара родился 9 сентября 1934 г. в с. Омельник Кременчугского района Полтавской области. После окончания средней школы в 1952 г. поступил в Днепропетровский горный институт на геологический факультет. По окончании института с 1957 по 1961 г. В.Л. Кожара работал на Алданском нагорье начальником отряда Южно-Якутской комплексной экспедиции

Якутского геологического Управления МГ и ОН. С 1961 по 1965 г. проходил аспирантуру в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР под научным руководством профессора, в дальнейшем академика А.И. Перельмана. С 1965 по 1967 г. работал младшим научным сотрудником в этом же институте.

В 1967 г. Владимир Леонидович перешел на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР. Основной темой всей его научной деятельности была проблема классификации в естествознании. В конце 1970-х – начале 80-х годов прошлого века в СССР в среде научно-технической интеллигенции возникло уникальное явление – классификационное движение. В.Л. Кожара был одним из координаторов и ученым секретарем классификационного движения, организатором нескольких школ-семинаров и конференций по методологии и теории классификации. В ходе многолетней кропотливой работы, им был усовершенствован язык общей теории классификации, разработана и верифицирована гипотеза о таксономическом насыщении, которая представляет собой мост между классиологией и прикладными классификациями. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ информативно-насыщенных таксономических структур как способ выявления географических закономерностей».

В начале 1990-х гг. он вместе с д.б.н. А.Г. Назаровым возглавлял экспертную группу, которая выполняла комплексную оценку и картирование состояния экосистем и здоровья населения Рудного Алтая (Восточно-Казахстанская область) по заданию Комитета общественной экспертизы СССР, Исполкома совета народных депутатов г. Усть-Каменогорска и областного комитета по экологии и природопользованию. Результатом работы коллектива разнопредметных специалистов стало заключение о неприемлемом качестве среды обитания в регионе, выявление зон экологического бедствия и комплекс предложений по социальной защите и реабилитации населения.

В.Л. Кожара был одним из организаторов ноосферного движения, председателем правления Ярославской общественной организации «Нюхора», деятельность которой была поддержана Комитетом по охране окружающей среды администрации Ярославской области, а также грантами нескольких фондов и общественных организаций.

До последних лет жизни он продолжал работать над капитальной монографией, посвященной классификационной проблеме и роли предельных классификаций в разных областях научного знания. Благодаря самоотверженным усилиям и неоценимой помощи со стороны друга Вла-

димира Леонидовича – доктора геолого-минералогических наук, заслуженного деятеля науки РФ Якова Эльевича Юдовича – первая часть этой монографии вышла 2021 г. под названием «Основы классиологии».



ИДА КИРИЛЛОВНА СТЕПАНОВА

(1937–2005)

кандидат химических наук

Ида Кирилловна Степанова родилась 4 февраля 1937 г. в г. Полтава (УССР). В 1960 г. окончила Днепропетровский государственный университет, кафедру аналитической химии. С февраля 1962 г. по декабрь 1967 г. Ида Кирилловна работала младшим научным сотрудником в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР

в лаборатории чистых веществ, где занималась исследованием поведения ряда химических элементов на ртутном капельном электроде и разработкой методов полярографического определения примесей в веществах высокой частоты.

В январе 1968 г. поступила на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР. В 1972 г. И.К. Степанова защитила кандидатскую диссертацию «Исследование поведения и каталитических свойств ниобия с целью разработки методов определения его микрограммовых количеств» по специальности аналитическая химия. И.К. Степанова являлась одним из ведущих специалистов по изучению форм миграции железа и кремния во внутренних водоемах. Ею разработаны оригинальные и модифицированы известные методики определения различных форм железа, кремния и компонентов органического вещества. Занималась изучением закономерностей распределения одного из самых токсичных металлов – ртути в абиотических и биотических компонентах нейтральных и кислых озер различной типологии, распределением ртути в органах и тканях рыб, влиянием ряда факторов на уровень ее накопления.

В 1988 г. И.К. Степанова принимала участие в экспедиции на НИС «Витязь» в восточной части Атлантического океана, проводимой Институтом океанологии им. П.П. Ширшова. С 1989 г. по 1995 г. И.К. Степанова – руководитель аналитической группы в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии работала с 31.01.1968 г. по 28.02.2005 г.

ЭРНСТ САЯФНУРОВИЧ БИКБУЛАТОВ

(1939–2013)

кандидат химических наук



Эрнст Саяфнурович Бикбулатов родился 1 января 1939 г. в г. Уфе (Башкирская ССР). В 1954 г. поступил в Ишимбайский нефтяной техникум, где учился до июля 1956 г. Затем из-за переезда семьи у г. Уфу продолжил учебу в Уфимском нефтяном техникуме. После окончания учебы в 1958 г. работал оператором 7-го разряда на нефтехимическом комбинате в г. Салават. После службы в армии в 1962 г. поступил на химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, который закончил в 1967 г. по специальности радиохимия. В этом же году принят на работу в лабораторию гидрохимии ИБВВ АН СССР.

Научную деятельность как стажер-исследователь Эрнст Саяфнурович начинал под руководством заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора химических наук, профессора Бориса Александровича Скопинцева. В 1970–1975 гг. работал по теме «Деструкция органического вещества в природных водах» в лаборатории микробиологии. С 1976 г. исследовал компонентный состав органического вещества во внутренних водоемах. Э.С. Бикбулатов разработал новый метод определения нитритов в природных водах, установил функциональные связи между показателями степени окисленности органического вещества. Под руководством Э.С. Бикбулатова и непосредственном его участии проведены широкие исследования кинетики процессов трансформации природных органических веществ, которые привели к установлению ряда новых закономерностей, в частности к установлению новой геохимической константы – удельной скорости биохимического разложения природного гумуса. В 1983 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Функциональные связи между элементарным составом и обобщенными показателями свойств органического вещества природных вод» по специальности гидрохимия.

Э.С. Бикбулатов значительное внимание уделял исследованию процессов эвтрофикации водоемов. Впервые было показано, что существуют водоемы, в которых лимитирование первичной продукции происходит сразу по трем компонентам – азоту, фосфору и кремнию, детальное изучение которых может внести принципиально новый вклад в лимнологию. Им проведены пионерские исследования и обобщение материалов по распространению, местам локализации и механизмам образования токсических промежуточных продуктов глобальных процессов нитрификации, денитрификации,

азотфиксации в водоемах различного трофического статуса. Итогом работы была первая в мировой практике монография «Гидроксиламин и гидразин в водных экосистемах».

Э.С. Бикбулатов пристальное внимание уделял методологическим и методическим вопросам химического анализа природных вод. Им разработаны и существенно модифицированы методы определения гидроксиламина и гидразина в водных объектах. Бикбулатовым Э.С. в соавторстве с сотрудниками лаборатории написаны крупные обобщающие работы по химии водоемов различной степени трофии. Успешно руководил специализированной группой по исследованию органического вещества и биогенных элементов в природных водах. Э.С. Бикбулатов известный специалист в области химии природных вод. Им опубликовано свыше 100 научных работ.



ЕКАТЕРИНА МАКСИМОВНА
БИКБУЛАТОВА

(1942–2014)

кандидат химических наук

Екатерина Максимовна Бикбулатова родилась 18 февраля 1942 г. в п. Раденск Херсонской области. В 1967 г. Екатерина Максимовна окончила химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности химик-аналитик. В этом же году вместе с Э.С. Бикбулатовым поступили на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР.

В 1978 г. Е.М. Бикбулатова защитила кандидатскую диссертацию «Трансформация во времени органического вещества отмершего фитопланктона и образующихся взвесей (в экспериментальных условиях)». Занималась изучением процессов формирования органического вещества воды водохранилищ и озер волжского бассейна, а именно особенностями пространственного распределения и формами миграции в водной толще, основными закономерностями трансформации органического вещества. Новыми вопросами в практике деструкционных процессов – рассмотрением кинетики различной «стабильной» фракции органического вещества природных вод на фоне лабильной. Предложенная удельная константа скорости распада свидетельствует о возможности применения ее для решения теоретических и прикладных задач по самоочищению водоемов.

Впервые Е.М. Бикбулатовой с соавторами в воде озер и водохранилищ Европейской территории России исследовано пространственное и вертикаль-

ное распределение важных промежуточных продуктов трансформации азотсодержащих соединений – гидразина и гидроксилamina. Известны ее работы с биологами. Е.М. Бикбулатова являлась руководителем грантов РФФИ. Неоднократно была начальником комплексных экспедиций на водохранилища Волжского каскада. Годы работы в лаборатории 07.08.1967 г. – 19.08.2014 г.

ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛАРИОНОВ

(1947–1992)

кандидат химических наук



Родился в 1947 г. Окончил Ленинградский Гидрометеорологический институт по специальности инженер-океанолог. С 1968 по 1970 гг. был на практике в ИБВВ, специализировался в области гидрохимии. В 1970 г. обучался в аспирантуре без отрыва от производства, работал старшим лаборантом, затем – младшим научным сотрудником. В лаборатории работал до октября 1978 г. За время работы им обработан большой и трудоемкий материал, необходимый для разработки химических и биохимических критериев лабильного и стойкого органического вещества взвесей. Проведен ряд экспериментальных исследований. Программа анализов включала более 15 ингредиентов. Им освоены многие методы гидрохимического анализа. Работал по теме института (1971–1975 гг.): «Биохимическая лабильность органического вещества взвесей вод водоемов разной трофности».

ВЛАДИМИР ЛЕОНТЬЕВИЧ СКЛЯРЕНКО

кандидат географических наук



Владимир Леонтьевич Складренко родился 24 октября 1940 г. в Кировоградской области (УССР). В 1970 г. окончил Ленинградский гидрометеорологический институт по специальности инженер-океанолог. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию «Применение многомерного анализа к прогнозу объема весеннего стока рек и планированию рациональной сети станций наблюдений за комплексом характеристик вод внутренних водоемов».

В.Л. Складренко занимался изучением многолетних колебаний стока р. Волги. Научные интересы связаны с применением методов многомерного статистического анализа и теории случайных процессов в гидрологии для решения задач классификации, районирования и прогноза стока

крупных рек. На протяжении многих лет В.Л. Складенко был руководителем комплексных работ по единой программе на оз. Плесеево.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ работал с апреля 1970 г. по июль 1991 г.



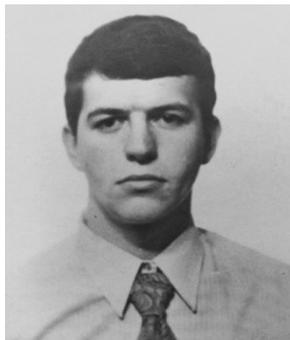
МАРИЯ ВАСИЛЬЕВНА ГАПЕЕВА

кандидат химических наук

Мария Васильевна Гапеева родилась 12 марта 1946 г. в с. Лопанка, Целинского района, Ростовской области. В 1968 г. окончила химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности химик-исследователь. В 1972 г. после окончания очной аспирантуры на химическом факультете МГУ защитила кандидатскую диссертацию.

И в этом же году поступила на работу в Институт химической физики РАН (г. Черноголовка).

С 1978 по 2000 г. М.В. Гапеева работала в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, а затем в лаборатории физиологии и токсикологии. Ее научные интересы лежат в области изучения биогенных элементов и биомониторинга тяжелых металлов. Существенным результатом работы является расчет среднегодовых балансов биогенных элементов в Рыбинском водохранилище. М.В. Гапеева для оценки качества донных отложений озер и водохранилищ применяла триадный подход, который объединяет данные химических анализов, токсикологических и бентосных характеристик. Марией Васильевной в соавторстве составлены и зарегистрированы 8 баз данных, при этом использовались в основном труды, опубликованные сотрудниками ИБВВ РАН за 50-летний период научной деятельности.



ИГОРЬ ФЕДОРОВИЧ ФОМИЧЕВ

кандидат географических наук

Игорь Федорович Фомичев родился 16 ноября 1952 г. в г. Кировабад Аз. ССР. В 1975 г. окончил арктический факультет Ленинградского высшего инженерно-морского училища им. адм. С.О. Макарова по специальности инженер-океанолог. В январе 1976 г. И.Ф. Фомичев поступил в очную аспирантуру ЛВИМУ по специальности «гидрология суши»

(рук. Н.В. Буторин). В 1978 г. после окончания аспирантуры был принят

на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР на должность младшего научного сотрудника.

В 1982 г. И.Ф. Фомичев защитил кандидатскую диссертацию «Многолетние изменения элементов гидрологического режима Рыбинского водохранилища и расчет их в связи с территориальным перераспределением стока». В 1976–1978 гг. И.Ф. Фомичев принимал участие в комплексных экспедициях по предполагаемой трассе переброски стока северных рек в бассейн Волги. Занимался изучением влияния гидрометеорологических факторов на распространение загрязнения в водоемах, расчетом установившихся ветровых течений Рыбинского водохранилища. Вместе с А.С. Литвиновым внедрили в практику экспедиционных исследований непрерывные регистрации гидрофизических параметров по ходу судна на ряде разнотипных внутренних водоемов.

В лаборатории гидрологии и гидрохимии работал до 1982 г.

ВЯЧЕСЛАВ ПЕТРОВИЧ КУРДИН

(1921–2005)

Вячеслав Петрович Курдин родился 5 апреля 1921 г. в г. Климовск Подольского района Московской области в семье служащего. В 1941 г. окончил Московский гидрометеорологический техникум по специальности техник-гидролог. В июне 1941 г. подал заявление о добровольном зачислении в ряды РККА и был направлен в 1-е Московское Краснознаменное пехотное училище. В составе училища был отправлен на фронт. В боях был дважды контужен. Раненым попал в плен и находился в концентрационных лагерях Белоруссии, Польши и Германии. Дважды бежал из плена, но неудачно. В жизни Вячеслава Петровича был интересный эпизод, который он рассказывал своим и польским коллегам. В конце войны колонна советских военнопленных проходила с песней на вокзал по улицам г. Торунь (Польша) для оправки на Родину. А в это время его родители, военные санитары, стояли на балконе и не знали, что в этом строю шел их сын. Спустя некоторое время они узнали об этом.



После войны В.П. Курдин работал на строительстве заводов, а затем на гидрометеостанции «Щербаковское море» старшим техником-гидрологом в пос. Переборы Ярославской области. С ноября 1954 г. – научным сотрудником на биологической станции «Борок», а затем в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР.

Область научных интересов В.П. Курдина – грунтовый комплекс верхневолжских водохранилищ, исследованию которого он посвятил всю свою жизнь. Им написано более 40 научных статей по формированию, распределению и качественному составу донных отложений. Эти труды вошли в золотой фонд Института и имеют важное научное и прикладное значение. В.П. Курдиным разработана классификация грунтов водохранилищ по содержанию пелитовых частиц и органического вещества с учетом генезиса.

В.П. Курдин награжден орденом Отечественной войны II степени (1985 г.) и юбилейными медалями. Годы работы в лаборатории 04.10.1954 г. – 01.11.1981 г.



ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА КУРДИНА
(1923–2011)

Татьяна Николаевна Курдина родилась 20 января 1923 г. в д. Носково Дмитровского района Московской области. Перед войной она окончила Московский гидрометеорологический техникум по специальности техник-гидролог. В 1941 г. Татьяна Николаевна эвакуирована в г. Челябинск, где трудилась контролером ОТК на заводе. По возвращении из эвакуации работала по специальности на Такта-Базарской гидрометеостанции в Туркмении. После войны Татьяна Николаевна служила инженером на заводе в Московской области. Вместе с В.П. Курдиным переехала в пос. Переборы Ярославской области, где работала инженером-гидрологом на гидрометеостанции «Щербаковское море». С октября 1954 г. была переведена на научно-исследовательскую биологическую станцию «Борок». В 1973 г. окончила заочно Ярославский государственный педагогический институт им. К.Д. Ушинского.

Область научных интересов Т.Н. Курдиной – формирование и динамика водных масс, термического режима Иваньковского и Рыбинского водохранилищ. Т.Н. Курдина исследовала роль метеорологических и гидрологических факторов в формировании термического режима водохранилищ. Ею рассчитан тепловой баланс Иваньковского водохранилища, рассмотрена его изменчивость в зоне воздействия Конаковской ГРЭС.

Т.Н. Курдина была депутатом Некоузского районного Совета, председателем жилищной комиссии Профкома института, членом Совета пайщиков при Борковском торговом предприятии. Награждена

нагрудным знаком «Отличник гидрометеослужбы» и юбилейной медалью «За трудовую доблесть».

Научные исследования на биологической станции «Борок» в 1950-е годы (из воспоминаний Т.Н. Курдиной). Организация исследований на Рыбинском водохранилище началась с выбора характерных и доступных участков наблюдений: в Волжской плесе разрез Борок–Коприно, в Моложском – участок против пос. Брейтово. Выбор участков работ определялся и близостью зимних санных дорог. Биологическая станция для проведения зимних работ на водоеме имела «тягловую силу» – двух лошадей и сани. На одних была установлена утепленная фанерная будка, где находились печка, столик, скамьи (они же спальные места), туда же помещалось оборудование, отобранные пробы и втискивались люди. Дрова, корм для лошади крепились на тех же санях. С такими перегруженными санями двигаться можно было только по наезженной дороге. По глубокому рыхлому снегу лошадь долго тащить сани не могла. В таком случае «оперативным» транспортом были научные работники, бравшие на плечи рюкзаки с приборами, в руки веревку от санок, нагруженных лебедкой, вьючными ящиками с посудой, дночерпателем, трубкой для взятия проб грунта. Выходили на лед по 2–3 человека (обязательно был крепкий мужчина), так как во льду надо было пробивать пешней лунки. В конце зимы при насте люди и санки вставали на лыжи.

На разрезе Борок–Коприно работать в дневное время было относительно легко. Здесь проходила санная дорога, обставленная вешками, а до станций от Борка было 3–4 км. Обычно сотрудники биостанции приходили сюда пешком или на лыжах. Труднее – проводить суточные наблюдения за изменением скорости и направления течения, лошадь, укрытая попоной, и сани с будкой ставились близ дороги, чтобы по окончании работ можно было выбраться на наезженный лед. Работать было тяжело – холодно, темно, при сильном ветре, метели керосиновый фонарь тухнет и дает мало света.

Еще труднее «взять станцию» выше или ниже по течению. Подъехать к месту работы на лошади можно лишь при небольшой высоте снега, но вначале зимы местами неокрепший лед, а весной по последнему льду выезд на лед не разрешался. Только с рюкзаками на плечах и веревкой в руке добирались сотрудники до станций, обходя осторожно уже известные места с ненадежным льдом.

Моложский плес для зимних работ был доступен, поскольку до Брейтова шла грунтовая дорога; от Брейтова в широкую часть плеса рыбаки-промысловики пробивали дороги к выставленным сетям.

Ездили рыбаки на лошадях. Этими дорогами частично пользовались работники биостанции, хотя и здесь им приходилось впрягаться в саночки. Большие трудности в работе создавала удаленность мест наблюдений от жилья. Ночевки на льду тяжелы: мало плохо обустроенных спальных мест, холодно – много дров взять нельзя, трудно готовить еду. При обильном снегопаде, в метель оставаться на ночь на льду опасно – заметет дороги, не выбраться. Поэтому старались на ночь уезжать в поселок, где тепло, покормят, хоть на полу выспаться и лошадь отдохнет.

В безледный период, имея плавсредства, подойти к станции легче, весь водоем доступен. Экспедиционные плавсредства биостанции представляли два катера – Академик Морозов с металлическим корпусом и разрешением на выход при силе ветра до 5 баллов и деревянный Борок с большим ограничением на выход. Морозов был оборудован двумя ручными лебедками с кранбалками, на корме и трюме имел большое помещение под химическую лабораторию, где помещался один урезанный лабораторный стол. На Борке – одна лебедка, лаборатории практически нет.



СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ БАКАСТОВ

(1923–2007)

Сергей Сергеевич Бакастов родился 29 декабря 1923 г. в г. Москве. В 1953 г. окончил Московский институт инженеров водного хозяйства по специальности инженер-гидротехник. С ноября 1941 г. по март 1948 г. служил в Советской армии. С.С. Бакастов занимался исследованием повышения уровня грунтовых вод в связи с заполнением Рыбинского водохранилища. Им обобщены многолетние материалы по температурному режиму мелководной зоны и донных отложений водохранилища.

С.С. Бакастов определил методы расчета теплофизических характеристик и теплозапаса грунтов Рыбинского водохранилища. С.С. Бакастов награжден орденом Отечественной войны II степени (1985 г.), медалью «30 лет Советской армии и флота».

Годы работы в лаборатории с 13 марта 1956 г. по 1 апреля 1984 г.

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ФОТИЕВ

(1913–2000)



Александр Васильевич Фотиев родился 30 августа 1913 г. в д. Городище мещанской слободы под названием Щелковская, которая затем вошла в Московский уезд. В 1940 г. окончил химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности химик. По окончании обучения был распределен в г. Минск на химзавод. С первых дней войны Александр Васильевич пошел на фронт. Военная часть, в которой он служил, попала в окружение, затем в плен. Летом 1943 г. он вместе с группой военнопленных совершили побег и присоединились к партизанскому отряду.

После войны А.В. Фотиев работал на одном из предприятий в республике Беларусь.

В 1955 г. А.В. Фотиев переехал в Борок и был принят на работу в лабораторию гидрологии. Основные научные интересы А.В. Фотиева связаны с неорганической химией природных вод. Он проводил исследования состава взвесей в воде водохранилищ, изучал закономерности, в частности газового режима волжских водохранилищ на примере Горьковского. А.В. Фотиев внедрил в лабораторную практику методики ионообменного определения общего содержания ионов и ионов сильных кислот в окрашенных водах. Занимался изучением аллохтонного органического вещества в пресных водоемах, образованием и природой гумусовых веществ верховых и низинных болот. А.В. Фотиев модифицировал метод выделения органических веществ из природных вод путем вымораживания. Им показана реальность существования гумусовых кислот и фульвокислот в природных водах.

А.В. Фотиев был награжден орденом Отечественной войны II степени (1985 г.), медалями «Партизану Отечественной войны (1944 г.)», «В память 800-летия Москвы» (1948 г.).

Работал в лаборатории гидрологии и гидрохимии с 06.12.1955 г. по 12.01.1981 г.



КОНСТАНТИН АНДРЕЕВИЧ БАКУЛИН

(1925–2003)

Константин Андреевич Бакулин родился 1 ноября 1925 г. в с. Теньки Татарской АССР. В феврале 1943 г. призван в армию Сенгилеевским РВК Ульяновской области. Служил младшим лейтенантом сначала в 47 запасном стрелковом полку, затем в 176 стрелковом полку 46 стрелковой дивизии. Путь части в этот период: Ленинград (05.1943 г.) – Эстония (1944 г.) – Польша (1945 г.) – Германия (остров Засниц на Германской Балтике 1945 г.). Закончил службу 27.10.1947 г.

Константин Андреевич после войны окончил Московский гидрометеорологический техникум по специальности техник-гидролог, в 1972 г. – заочно географический факультет Ярославского педагогического института им. К.Д. Ушинского. Он начинал трудовую деятельность инженером-гидрологом на гидрометеостанции «Щербаковское море» в пос. Переборы Ярославской области. С 1961 г. – научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ. Итогом его работы была основополагающая статья «Морфометрические характеристики Рыбинского водохранилища», которая является классикой научного подхода в изучении экосистемы водохранилища, и цитируется многими исследователями. В 1974 г. К.А. Бакулин переехал в Якутию, где был начальником Якутского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Награжден медалью «За победу над Германией» (1945 г.), орденом Отечественной войны II степени (1985 г.). В лаборатории гидрологии ИБВВ АН СССР работал с 13 октября 1961 г. по 18 апреля 1974 г.



ВАЛЕНТИНА ФЕДОРОВНА РОЩУПКО

(1938–2022)

Валентина Федоровна Рощупко родилась 24 марта 1938 г. в г. Нефтегорске Апшеронского района, Краснодарского края. Из воспоминаний Валентины Федоровны: «в 1943 г. отец погиб на фронте, мама осталась одна с четырьмя детьми, жили очень бедно. В школу ходили за 5 км через лес, дорога была трудной и опасной». После окончания школы Валентина Федоровна не захотела поступать в Нефтяной институт в г. Нефтегорске, как почти все одноклассники, а уехала в Москву. Деньги на билет получила

только в один конец. В Московский государственный университет В.Ф. Рощупко сразу не поступила, устроилась на работу и училась в электромеханическом ПТУ. Только через год она стала студенткой МГУ. В 1962 г. окончила Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова по специальности географ-картограф.

В 1964 г. В.Ф. Рощупко поступила на работу в лабораторию гидрологии и гидрохимии ИБВВ АН СССР. Ее руководителем и наставником был доктор биологических наук, проф. М.А. Фортунатов. Валентина Федоровна вместе с Михаилом Алексеевичем участвовала в экспедиционных рейсах по Волге от ее истоков до устья, где велись работы по определению цветности и перманганатной окисляемости воды. Также проводились работы на озерах Ярославской области, и был составлен кадастр водохранилищ мира.

В.Ф. Рощупко принимала активное участие в сборе и обработке материалов во время проведения международного многоуровневого эксперимента «Внутренние водоемы». При ее участии выполнены исследования многолетней изменчивости элементов водного баланса волжских водохранилищ, особенностей формирования их термического режима, динамики теплозапасов и теплового стока. С 2001 г. по 2008 г. В.Ф. Рощупко была начальником стандартных рейсов на Рыбинское водохранилище.

Годы работы в лаборатории 1964 г. – февраль 2009 г.

ВИКТОРИНА НИКОЛАЕВНА СКЛЯРЕНКО

Викторина Николаевна Скляренко родилась 22 августа 1950 г. в г. Вологде. В 1972 г. окончила Ленинградский гидрометеорологический институт по специальности инженер-метеоролог. Область научных интересов В.Н. Скляренко – создание имитационной математической модели формирования стока и качества воды в бассейне озера Плещеево. Разработан новый метод оценки внешней антропогенной нагрузки на водоем.



В.Н. Скляренко работала в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН с 1972 г. по ноябрь 1992 г.



ЮРИЙ ВИКТОРОВИЧ ЕРШОВ

Ершов Юрий Викторович родился 23 октября 1937 г. в с. Грозное (Киргизская ССР). В 1971 г. окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности физик.

Ю.В. Ершов разработал методы оценки биогенных и антропогенных углеводов, смол, нефтяного загрязнения и оценки токсичности воды и донных отложений водоемов.

Годы работы в лаборатории март 1971 г. – октябрь 2017 г.

Заключение

С момента организации гидрологических наблюдений в Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН на внутренних водоемах России и сопредельных государств приборная база и методы изучения основных абиотических параметров водной среды постоянно модифицировались и улучшались. Ряд традиционных классических методик регистрации и описания гидрометеорологических характеристик водоема и водосбора остаются в настоящее время без каких-либо существенных изменений. Наряду с ними все большую популярность и перспективность приобретают методы математического моделирования гидрологических и гидробиологических процессов и дистанционные методы (ДЗЗ) изучения водных экосистем.

Рассматривая внутриводоемные процессы с позиций возникшей недавно междисциплинарной науки – гидроэкологии, очевидно, что в техногенных водоемах еще в большей степени, чем в озерах, проявляется взаимосвязь абиотических и биотических компонентов водной экосистемы (Эдельштейн, 1998). При этом синхронность и синтопность сбора разносторонних материалов позволяют с большей глубиной и достоверностью оценивать взаимосвязи организмов и популяций со средой и выделять новые, ранее не изученные факториальные зависимости (Экологические факторы..., 1993).

Природные воды – один из основных элементов биосферы – должны функционировать нормально и бесконечно долго. Поэтому проблема рационального использования и охраны водных ресурсов и по сей день не теряет своей актуальности. Одним из значимых направлений решения этой проблемы выступают комплексные эколого-географические исследования в районах активного преобразования природной среды (водохранилища, устья рек, районы подземных водозаборов и др.), включая водные объекты в пределах заповедных территорий, как под воздействием хозяйственных мероприятий, так и возможных изменений климата (Авакян, Широков, 1994).

ЛИТЕРАТУРА

- Авакян А.Б., Широков В.М. Рациональное использование и охрана водных ресурсов. Екатеринбург: «Виктор», 1994. 319 с.
- Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1965. 436 с.
- Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 289 с.
- Алексеевский Н.И., Михинов А.Е. Формирование и динамика наносов в речной сети и береговой зоне водоемов // Итоги науки и техники. Сер. Гидрология суши. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 8. 183 с.
- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
- Асташкин А.А., Карелин А. В., Кузьмин Ю.А., Маргун О.К., Маркелова Т.С., Наговицына Н.В., Твердохлебова Е.М. Обзор орбитальных группировок океанографических космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ, 2018. Т. 165. № 4. С. 9–19.
- Баканов А.И., Законнов В.В., Литвинов А.С. Бентос Чебоксарского водохранилища. Влияние загрязнений и мониторинг грунтов // Биология внутр. вод. 2006. № 4. С. 91–99.
- Бакастов С.С. Распределение и динамика температуры дна Рыбинского водохранилища в зимний период // Тр. ИБВВ АН СССР. 1965. Вып. 7(10). С. 69–78.
- Бакулин К.А. Морфометрические характеристики Рыбинского водохранилища // Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Л.: Наука, 1968. С. 72–86.
- Бикбулатов Э.С. О методе определения общего фосфора в природных водах // Гидрохим. материалы. 1974. Т. 60. С. 167–173.
- Бикбулатов Э.С. Простой способ окисления органического вещества природных вод для определения органического углерода. // Гидрохим. материалы. 1974. Т. 60. С. 174–178.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: «Рыбинский Дом печати», 2003. 192 с.
- Бикбулатов Э.С., Верещагин В.М. Применение сульфаниламида и нафтиламина для определения нитритов в природных водах. Тез. докл. 2-го Всесоюзного совещания по анализу природных вод. Москва. 1977. С. 184.
- Бикбулатов Э.С., Скопинцев Б.А., Бикбулатова Е.М. Определение органического углерода в пресных водах персульфатным методом // Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск, 1969. С. 147–155.
- Бикбулатова Е.М., Скопинцев Б.А., Бикбулатов Э.С. Определение валового органического углерода в пресных водах фотохимическим методом // Материалы к совещанию по прогнозированию биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск, 1969. С. 140–147.
- Благуш П. Факторный анализ с обобщениями. М.: Финансы и статистика, 1989. 248 с.
- Богословский Б.Б. Морфология и морфометрия озер и водохранилищ. Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. 31 с.
- Бочаров А.В. Оценка современного состояния внутреннего водоема на основе методов дистанционного зондирования на примере Ивановского водохранилища // Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Тверь, 2021. 21 с.
- Бочаров А.В., Тихомиров О.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки изменений прибрежной зоны водохранилищ // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 4(4). С. 625–632.

- Бояринов П.М., Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 176 с.
- Бузников А.А. Академик К.Я. Кондратьев – выдающийся ученый и организатор науки // Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20–21 октября 2020 г., Санкт-Петербург Сборник статей. СПб.: 2020. С. 4–13.
- Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Александров С.В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
- Буторин Н. В., Успенский С. М. Значение мелководий в биологической продуктивности водохранилищ // Биологические ресурсы водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 23–41.
- Буторин Н.В. Всеволод Илidorович Рутковский // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. Л.: Наука, 1973. № 20. С. 3–4.
- Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 324 с.
- Буторин Н.В. О скоростях течения Волги от Рыбинска до Сталинграда // Бюлл. Ин-та биол. водохранил. 1958. № 2. С. 37–40.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
- Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 224 с.
- Буторин Н.В., Литвинов А.С. Опыт применения самописца течений Ю.К.Алексеева для изучения скоростного режима водохранилищ // Бюлл. Ин-та биол. водохранил. 1962. № 12. С. 59–62.
- Буторин Н.В., Смирнов А.М. Автономный измерительный пункт на Рыбинском водохранилище // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1972. № 16. С. 68–71.
- Буторин Н.В., Эдельштейн К.К. Опыт применения электробифилярной вертушки (ЭБВ-7) для изучения течений Рыбинского водохранилища // Бюлл. Ин-та биол. водохранил. 1961. № 11. С. 65–68.
- Винберг Г.Г. Международный лимнологический конгресс // Гидробиологический журнал. 1978. Т. 14, № 2. С. 121–129.
- Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Ведерников В.И. Характеристика эпипелагических экосистем Тихого океана на основе спутниковых и экспедиционных данных. Первичная продукция и ее сезонные изменения // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 241–249.
- Выхристюк Л.А., Варламова О.С. Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2003. 174 с.
- Гавеман А.В. Московское море. Калинин, 1955. 140 с.
- Гапеева М.В., Разгулин С.М., Скопинцев Б.А. Ампульный персульфатный метод определения общего азота в природных водах. // Гидрохим. материалы. 1984. Т. 87. С. 67–70.
- Герасимов Ю.В., Поддубный С.А., Малин М.И., Цветков А.И. Влияние гидродинамических условий на распределение рыб в Чебоксарском водохранилище // Вопросы рыболовства. 2014. Т. 15. № 3. С. 295–305.
- Герман А.В., Законнов В.В. Аккумуляция полихлорированных бифенилов в Шекснинском плесе Рыбинского водохранилища // Водн. ресурсы. 2003. Т. 30. № 5. С. 571–575.
- Герман А.В., Законнов В.В., Мамонтов А.А. Хлорорганические соединения в донных отложениях, бентосе и рыбе волжского плеса Рыбинского водохранилища // Водн. ресурсы. 2010. Т. 37. № 1. С. 84–88.

- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 290 с.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 269 с.
- Гончаренко И.А., Федеряков В.Г., Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И. Тематическая обработка данных AVHRR на примере изучения прибрежного апвеллинга // Иссл. Земли из космоса. 1993. № 2. С. 97–108
- Горбачкий В.В., Шпилев Н.Н., Лебедева Е.С. Контроль течений на поверхности прибрежных морских акваторий дистанционными методами // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2022. Т. 1. № 399. С. 159–167.
- Горбунов Н.М., Тихонов С.А., Горбунова З.Н. Количественные определения глинистых минералов в почвах // Почвоведение. 1972. № 5. С. 27–46.
- ГОСТ 17.1.1.01-77 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
- ГОСТ 31861-2012 ВОДА. Общие требования к отбору проб.
- ГОСТ 3351-74. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности.
- Гузиватый В.В., Науменко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции // Иссл. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 20–30.
- Даценко Ю.С., Иваненко С.А., Корявов П.П., Эдельштейн К.К. Математическая модель динамики вод и распространения загрязняющих примесей в Иваньковском водохранилище // Водн. ресурсы. 2000. № 3. С. 292–307.
- Даценко Ю.С., Эдельштейн К.К. Основы управления водными экосистемами. М.: Изд-во МГУ, 2001. 108 с.
- Девяткин В.Г. Шихова Н.М. Памяти Юрия Михайловича Лебедева // Биол. внутр. вод. 2002. № 4. С. 106–107.
- Демин Ю.Л., Ахвердиев И.О., Литвинов А.С., Поддубный С.А. О роли бароклинных эффектов в динамике Рыбинского водохранилища // Водн. ресурсы. 1991. № 4. С. 55–65.
- Ерлов Н.Г. Оптика моря: Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 242 с.
- Ершов Ю.В. Содержание углеводов в воде и грунтах оз. Плещеево // Функционирование озерных экосистем. Рыбинск, 1983. С. 27–38.
- Ершова М.Г., Эдельштейн К.К. О методике измерения электропроводности водных масс волжских водохранилищ // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 1966. Вып. 12(15). С. 304–310.
- Живаго А.В. Современные геоморфологические процессы на берегах Кубенского озера и Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та океан. АН СССР. 1954. Вып. 10. С. 92–108.
- Законнов В.В. Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях Верхневолжских водохранилищ: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Пермский ун-т. Пермь, 1983. 23 с.
- Законнов В.В. Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Волги // Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 3–16.
- Законнов В.В., Иванов Д.В., Законнова А.В., Кочеткова М.Ю., Маланин В.П., Хайдаров А.А. Пространственно-временная трансформация донных отложений водохранилищ Средней Волги // Водн. ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 583–581.
- Законнов В.В. К методике механического анализа донных отложений // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1980. № 46. С. 74–76.
- Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 39 с.

- Законнов В.В., Волкова З.В., Законнова А.В. Каскад водохранилищ и его роль в регулировании твердого стока и управлении качеством воды Нижней Волги // Водное хозяйство России. 2022. № 4. С. 5–21.
- Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 7. Формирование наносов в высокопроточных водохранилищах Волжского каскада // Водное хозяйство России. 2021. № 4. С. 20–46.
- Законнов В.В., Зиминова Н.А. Балансы биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984. С. 114–122.
- Законнов В.В., Иконников Л.Б., Законнова А.В. Формирование берегов и донных осадков Чебоксарского водохранилища // Водн. ресурсы. 1999. Т. 26. № 4. С. 418–426.
- Законнов В.В., Поддубный С.А. Изменение структуры донных отложений в Рыбинском водохранилище // Водн. ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 200–209.
- Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
- Залата А.Е. Дистанционный мониторинг преобразования Воронежского водохранилища под воздействием комплекса природно-антропогенных факторов / А.Е. Залата, К.Ю. Силкин // Материалы научной сессии Воронежского государственного университета. Секция экологической геологии. Воронеж, 2015. Вып. 6. С. 17–22.
- Зиминова Н.А. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР. Вып. 6(9). 1963. С. 230–249.
- Зиминова Н.А., Законнов В.В. Накопления углерода, азота и фосфора в донных отложениях Иваньковского водохранилища // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1980. № 45. С. 50–53.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Баланс взвешенных веществ в Иваньковском водохранилище // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР. 1974. Вып. 26(29). С. 89–94.
- Зиминова Н.А., Трифонова Н.А. Состав и седиментация взвесей Рыбинского водохранилища в зимний период // Материал по биологии и гидрологии волжских водохранилищ. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 117–118.
- Зубов Н.Н., Мамаев О.И. Динамический метод вычисления элементов морских течений. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1956. 116 с.
- Исаев М.Д. Автоматическая судовая измерительная станция // Биология внутренних вод: Информ. бюл. 1974. № 23. С. 67–69.
- Исследование течений в озерах и водохранилищах (практическое пособие). Л.: Гидрометеоздат. 1972. 319 с.
- К 75-летию профессора Владимира Владимировича Мелентьева // Иссл. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 94–96.
- Калацкий В.И. Моделирование вертикальной термической структуры деятельного слоя океана. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 216 с.
- Калинин Г.П., Курилова Ю.В., Колосов П.А. Космические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 185 с.
- Карасев И.Ф., Шумков И.Г. Гидрометрия. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 384 с.
- Кассациер К.Е., Кошчева Т.И. Анализ погрешностей ультразвукового доплеровского профилографа при измерении скорости течений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 4. С. 60–64.
- Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 1. С. 37–46.

- Китайгородский С.А., Миропольский Ю.З. К теории деятельного слоя открытого океана // Журн. Изв. АН СССР, серия ФАО. 1970. Т. 6. № 2. С. 178–188.
- Книга Памяти. Посвящена ветеранам войны – сотрудникам ИБВВ РАН, Борковской средней школы и больницы ИБВВ РАН. Ярославль: «Филигрань», 2022. Т. 1. 104 с.
- Кожара В.Л. Основы классиологии. Сыктывкар: «Коми республиканская типография», 2021. 488 с.
- Кондратьев К.Я., Васильев Л.И., Ведешин Л.А., Литвинов А.С., Мелентьев В.В., Мокиевский К.А. Международный комплексный многоуровневый эксперимент «Внутренние водоемы-87» // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 3. С. 119–122.
- Космический аппарат «Океан-О». Дата обращения: 11 ноября 2012. Архивировано 8 мая 2014 года.
- Кочеткова А.И., Брызгалова Е.С., Калюжная И.Ю., Сиротина С.Л., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П. Динамика зарастания Цимлянского водохранилища // Принципы экологии. 2018. № 1. С. 60–72.
- Кренке А.Н. Материалы по течениям Рыбинского водохранилища // Тр. биол. станции «Борок» им. Н.А. Морозова. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Вып. 3. С. 20–34.
- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин М.И., Романенко А.В., Поддубный С.А., Отюкова Н.Г. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. 2010. № 1. С. 65–75.
- Кузин П.С. Циклические колебания стока рек северного полушария. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 180 с.
- Кузнецов С.И., Романенко В.И., Кузнецова Н.С. Численности бактерий, продукция и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1970 г. // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л.: Наука, 1974. С. 94–110.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Законнов В.В. Стратификация горизонтов в донных осадках Рыбинского водохранилища // Водн. ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 552–555.
- Курдин В.П. Классификация и распределение грунтов Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР. 1959. Вып. I(4). С. 25–37.
- Курдин В.П. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ // Бюл. Ин-та биол. водохр. АН СССР. 1960. № 8–9. С. 57–61.
- Курдин В.П. Основные положения о процессах образования и распределения грунтов в верхневолжских водохранилищах // Тр. совещ. ихтиол. комиссии АН СССР. Вып. 10. Л.: Наука, 1961б. С. 53–60.
- Кутузов А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга системы “вода–суша” на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Иссл. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64–72.
- Кутузов А.В. Использование современных и архивных данных ДЗЗ для ГИС мониторинга околородных экосистем // Трансформация экосистем. 2018. №1. С. 1–5.
- Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 160–168.
- Кутявина Т.И., Вутман В.В., Ашихмина Т.Я. Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 36–40.

- Кучай Л.А., Литвинов А.С., Соколова Е.Н. Анализ многолетних и сезонных изменений термического режима и толщины поверхностного квазиоднородного слоя воды Рыбинского водохранилища в вегетационный период // Вода: химия и экология. 2015. № 9. С. 21–29.
- Кучай Л.А., Скляренко В.Л. Модель термической структуры оз. Плещеево // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 1993. Вып. 63(66). С. 66–72.
- Лабзовский Н.А. Расчет элементов волн в озерах и водохранилищах // Тр. Гос. гидрол. ин-та. 1976. Вып. 231. С. 126–143.
- Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрик В.Д. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.
- Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
- Литвинов А.С. О ветровых течениях на Белом озере // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1969. № 4. С. 35–39.
- Литвинов А.С. О некоторых статистических характеристиках течений в Ивановском водохранилище // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1977. № 34. С. 64–67.
- Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами БПВ-2р. Тр. ИБВВ АН СССР. 1968. Вып. 16(19). С. 259–268.
- Литвинов А.С. Об определении средних скоростей течения в нижних бьефах гидроэлектростанций // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1975. № 25. С. 53–56.
- Литвинов А.С. Опыт расчета установившихся ветровых течений на большом мелководном водоеме // Тр. Ин-та. биол. внутр. вод АН СССР. 1972. Вып. 23(26). С. 186–192.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. Водный баланс, водообмен и режим уровня Чебоксарского водохранилища в первые годы заполнения // Водн. ресурсы. 1986. № 3. С. 69–76.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. Характеристика гидрологических условий в Чебоксарском водохранилище в первые годы заполнения // Водн. ресурсы. 1994. Т. 21. № 3. С. 365–374.
- Литвинов А.С., Исаев М.Д. О структуре поля температуры поверхностного поля воды в районе сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1974. № 21. С. 63–66.
- Литвинов А.С., Поддубный С.А. Лаборатории гидрологии и гидрохимии 60 лет // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2016. Вып. 75(78). С. 5–15.
- Литвинов А.С., Поддубный С.А., Широков С.В., Корешков Б.К., Соколова Е.Н. Автоматизированный комплекс для исследования динамики водных масс и водохранилищ // Водн. ресурсы. 1994. Т. 21. № 6. С. 631–639.
- Литвинов А.С., Фадеева И.В., Чубаров В.В. Использование флуоресценции гумусового вещества для характеристики гидрологической структуры водоемов (на примере Рыбинского водохранилища) // Водн. ресурсы. 2008. Т. 35. № 3. С. 336–347.
- Литвинов А.С., Фомичев И.Ф. Два прибора для автоматизации измерения температуры воды // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1979. № 42. С. 51–53.
- Литвинов А.С., Фомичев И.Ф. Опыт расчета установившихся ветровых течений Рыбинского водохранилища // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1978. № 40. С. 50–54.
- Литвинов А.С., Ясовеев Р.Г. К методике исследования структуры поля температуры в поверхностном слое Рыбинского водохранилища // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1987. № 75. С. 68–71.
- Мамаев О.И. Т, S- анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970. 364 с.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

- Мизандронцев И.Б., Мизандронцева К.Н. Кислородный обмен между водной поверхностью и атмосферой над Байкалом // Метеорология и гидрология. 1993. № 2. С. 108–113.
- Мизандронцев И.Б., Мизандронцева К.Н. Газообмен между водной средой и атмосферой (на примере Байкала) // Водн. ресурсы. 1995. Т. 22. № 4. С. 439–445.
- Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
- Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водн. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
- Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. М.: Высшая школа, 1991. 368 с.
- Михайлов В.Н., Эдельштейн К.К. Оценка устойчивости и уязвимости водных экосистем с позиций гидроэкологии // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 1996. № 3. С. 27–34.
- Михайлова К.Б., Михалап С.Г. Многолетняя динамика площади зарастания гелофитной растительностью Псковского озера // Трансформация экосистем. 2019. № 2(1). С. 86–93.
- Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
- Морозов А.К., Ефимова М.А., Буржинский А.Г., Пнюшков А.Д. Опыт определения уровня воды озер по данным о длине береговой линии, полученным с применением дистанционного зондирования Земли // Молодой ученый. 2022. № 23 (418). С. 627–629.
- Муравейский С.Д. Очерки по теории и методам морфометрии (1948) / Реки и озера. Гидробиология. Сток. М.: Географгиз, 1960. С. 91–125.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1957а Вып. 6. Ч. 1. 400 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1957б Вып. 7. Ч. 1. 476 с.
- Научно-прикладной справочник. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. 190 с.
- Наша гордость и память. Рыбинск: «Рыбинский Дом печати», 2006. 143 с.
- Овчинников И.Ф. Краткий очерк Рыбинского водохранилища // Тр. биол. ст. «Борок». 1950. Вып. I. С. 105–138.
- Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. 372 с.
- Папченков В.Г. Степень зарастания Рыбинского водохранилища и продуктивность его растительного покрова // Биол. внутр. вод. 2013. № 1. С. 24–31.
- ПНД Ф 14.1.1-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. Москва, 1995 г.
- ПНД Ф 14.1:2.101-97 Методика выполнения измерений содержаний растворенного кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод иодометрическим методом. Москва, 1997 г.
- ПНД Ф 14.1:2.106-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфора общего в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом после окисления персульфатом. Москва, 1997 г.
- ПНД Ф 14.1:2.111-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации хлорид-ионов в пробах природных и очищенных сточных вод меркуриметрическим методом. Москва, 1997 г.
- ПНД Ф 14.1:2.112-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат-ионов в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом восстановлением аскорбиновой кислотой. Москва, 1997 г. (изд. 2004 г.)

- ПНД Ф 14.1:2.2-95 Методика измерений массовой концентрации железа в природных и сточных водах фотометрическим методом с о-фенантролином. ПНД Ф 14.1:2.2-95. Москва, 1005 г. (изд. 2004 г.).
- ПНД Ф 14.1:2.3-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрит-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. Москва, 1995 г.
- ПНД Ф 14.1:2.4-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. Москва, 1995 г. (изд. 2004 г.).
- ПНД Ф 14.1:2.61-96 Методика измерений массовой концентрации марганца в природных и сточных водах фотометрическим методом с персульфатом аммония. Москва, 1996 г. (изд. 2013 г.).
- ПНД Ф 14.1:2.95-97 Методика выполнения измерений содержаний кальция в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. Москва, 1997 г.
- ПНД Ф 14.1:2.98-97 Методика выполнения измерений жесткости в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. Москва, 1997 г.
- ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 Методика выполнения измерений pH в водах потенциометрическим методом. Москва, 1997 г. (изд. 2004 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:3:4.12397 Методика выполнения измерений биохимической потребности в кислороде после n-дней инкубации (БПК_{полн}) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. Москва, 1997 г. (изд. 2004 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Москва, 1998 г. (изд. 2012 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.15799 Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов, нитрит-ионов, сульфат-ионов, нитрат-ионов, фторид-ионов и фосфат-ионов в пробах природных, питьевых и очищенных сточных вод с применением системы капиллярного электрофореза «Капель». Москва, 1999 г. (изд. 2013 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.158-2000 (М 01-06-2013) Методика измерений массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Москва, 2002 г. (изд. 2014 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.1672000 Методика измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, лития, магния, стронция, бария и кальция в пробах питьевых, природных (в том числе минеральных) и сточных вод методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель». Москва, 2000 г. (изд. 2011 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.181-02 Методика измерений массовой концентрации алюминия в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Москва, 2002 г. (изд. 2010 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.182-02 Методика измерений массовой концентрации фенолов (общих и летучих) в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Москва, 2002 г. (изд. 2010 г.).
- ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003 Методика измерений бихроматной окисляемости (химического потребления кислорода) в пробах природных, питьевых и сточных вод фотометрическим методом с применением анализатора жидкости «Флюорат-02». Москва, 2003 г. (изд. 2012 г.).
- ПНД Ф 14.2.99-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации гидрокарбонатов в пробах природных вод титриметрическим методом. Москва, 1997 г. (изд. 2004 г.).

- ПНД Ф 14.2:4.154-99 Методика выполнения измерений перманганатной окисляемости в пробах питьевых, природных и сточных вод титриметрическим методом. Москва, 1999 г. (изд. 2004 г.).
- ПНДФ14.1:2.100-97 Методика выполнения измерений химического потребления кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. Москва, 1997 г.
- Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: «Рыбинский Дом печати», 2003. 328 с.
- Поддубный А.Г., Гордеев Н.А., Пермитин И.Е. Направление движения нагульных скоплений рыб и его связь с элементами среды // Тр. ИБВВ АН СССР. 1968. Вып. 16(19). С. 202–249.
- Поддубный С.А. Геометрическая модель устьевой области малой реки-притока водохранилища // Вода: химия и экология. 2015. № 12. С. 3–9.
- Поддубный С.А. Защищенные мелководья верхневолжских водохранилищ и их экологическое значение // Вода: химия и экология. 2013. № 11. С. 25–40.
- Поддубный С.А. Малая река как сложный аквально-территориальный комплекс // Вода: химия и экология. 2014. № 2. С. 41–46.
- Поддубный С.А. О вихревом характере отрицательной температурной аномалии в озере Плещеево // Биол. внутр. вод. Информ. бюл. 1986. № 71. С. 46–48.
- Поддубный С.А. Особенности термической стратификации и вертикального перемешивания оз. Плещеево // Тр. всерос. науч. конф. к 300-летию Отечеств. флота. Вып. 3. Переславль-Залесский, 1992. С. 20–27.
- Поддубный С.А. Применение геометрических моделей для изучения гидрологического режима защищенных мелководий водохранилищ. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Тр. VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Пермь, 30 мая–2 июня). Т. 1: Гидро- и геодинамические процессы. Пермь, 2019. С. 155–160.
- Поддубный С.А., Бычкова М.Б. О методе выделения областей влияния ветрового волнения и течения в прибрежной зоне водохранилищ // Водн. ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 730–737.
- Поддубный С.А., Законнова А.В., Цветков А.И., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Современный гидрологический режим волжских водохранилищ // Водн. ресурсы. 2023. Т. 50. № 3. С. 1–14.
- Поддубный С.А., Папченков В.Г., Чемерис Е.В., Бобров А.А. Зарастание защищенных мелководий верхневолжских водохранилищ в связи с их морфометрией // Биол. внутр. вод. 2017. № 1. С. 65–73.
- Поддубный С.А., Подгорный К.А. Использование двумерной математической модели для изучения термического режима Рыбинского водохранилища // Труды VII конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». Москва, РУДН 23–25 ноября 2009 г. М.: РУДН, 2009. С. 216–224.
- Поддубный С.А., Подгорный К.А., Цветков А.И., Цветкова М.В. Особенности гидродинамического режима и термической структуры руслового пруда малой реки // Географический вестник. 2013. № 2(25). С. 46–54.
- Поддубный С.А., Подгорный К.А., Цветков И.А. Применение метода математического моделирования для изучения гидродинамического режима разнотипных водных экосистем // Вода: химия и экология. 2011. № 8. С. 9–15.
- Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Рыбинск: «Рыбинский Дом печати», 2002. 120 с.

- Поддубный С.А., Цветков А.И., Иванова И.Н., Будников А.А., Цветкова М.В. Термические и динамические процессы в озере Плесеево // Тр. Ин-та биол. внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. № 90 (93). С. 7–26.
- Поддубный С.А., Чемерис Е.В., Кутузов А.В., Цветков А.И., Бобров А.А. Динамика высшей водной растительности защищенного мелководья в связи с уровнем воды в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Биол. внутр. вод. 2022. № 2. С. 136–146.
- Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Абиотические факторы воздействия на экологическое состояние озера Неро по данным математического моделирования. 2. Двухфазный массообмен в акватории // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. Вып. 91(94). С. 28–37.
- Прокофьев А.К., Орадовский С.Г., Георгиевский В.В. Непламенный атомно-абсорбционный метод определения Cu, Pb, Cd в морских донных осадках // Методы определения токсических загрязняющих веществ в морской воде и донных осадках. М.: Наука, 1981. С. 51–55.
- Распопов И.М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 197 с.
- РД 52.24.380-2006 Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с реактивом Грисса после восстановления в кадмиевом редукторе. Гидрохимический институт, 2006 г.
- Рекомендации по расчетам течений в шельфовой зоне морей / Под ред. Б.Х. Глуховского. М.: ГОИН, 1979. 177 с.
- Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
- Роль волнения в формировании биоценозов бентоса больших озер / Распопов И.Н., Воронцов Ф.Ф., Слепухина Т.Д. и др. Л.: Наука, 1990. 114 с.
- Романенко В.И., Законнов В.В. Общее количество бактерий в донных отложениях Рыбинского водохранилища на частицах разного размера // Биология внутр. вод. Информ. бюл. № 87. 1990. С. 9–13.
- Романенко В.И., Кузнецов С.И. Деструкция органического вещества в иловых отложениях // Микробиология. 1972. Т. 41. Вып. 2. С. 356–361.
- Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.
- Романенко В.И., Кузнецов С.И., Корельков С.И. Бактериальной разрушение перхлората аммония // Микробиология. 1976. Т. XLV. Вып. 2. С. 204–209.
- Руководящий документ 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «StreamPro» и «RioGrande». СПб.: ФБГУ «ГГИ», 2012. 84 с.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1972. 364 с.
- Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
- Сеидов Д.Г., Марушкевич А.Д. О расчете траекторий частиц в модели синоптических вихрей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 5. С. 412–421.
- Сильвестрова К.П., Краюшкин Е.В., Мысленков С.А. Анализ данных дрейфующих буев и буксируемого профилографа течений на подспутниковом полигоне в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 171–184.
- Синельников В.Е., Ершов Ю.В., Ширшова А.И. Выделение органических веществ из пены, образующейся при экстракции 4-хлористым углеродом // Инф. бюл. ИБВВ АН СССР. 1973. № 19. С. 63–65.

- Скопинцев Б.А., Бакулина А. Г., Ларионов Ю.В. Биохимическое потребление кислорода в атмосферных водах // Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах // Тр. ИБВВ АН СССР. 1974. Вып. 29(32). С. 41–50.
- Смирнов Н.П., Кондрацова О.Ф. Исследование многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим // Органическое вещество и элементы гидрологического режима Волжских водохранилищ. Тр. ИБВВ АН СССР. 1972. Вып. 23(26). С. 128–146.
- Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 432 с.
- Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 791 с.
- Страшкраба М., Гнаука А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 376 с.
- Тимченко В.М. Экологическая гидрология водоемов Украины. Киев: Наукова думка, 2006. 384 с.
- Тихомиров О.А., Бочаров А.В. Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов // Вестник ТвГУ. Серия «География и геоэкология». 2016. № 1. С. 5–11.
- Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Ивановского водохранилища // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2016. № 2. С. 230–244.
- Трифорова Н.А., Калинина Л.А. Об определении общего азота в воде // Биол. внутр. вод. Инф. бюлл. 1973. № 17. С. 64–66.
- Трифорова Н.А. Содержание и выделение соединений азота донными отложениями Рыбинского водохранилища // Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах // Тр. ИБВВ АН СССР. 1974. Вып. 29(32). С. 68–89.
- Трифорова Н.А., Былинкина А.А. О влиянии донных отложений на содержание биогенных элементов в воде // Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. ИБВВ АН СССР. 1977. Вып. 36(39). С. 72–90.
- Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Наука, 1960. 127 с.
- Физика океана. Гидрофизика океана Т. 1. / Под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1978. 455 с.
- Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб: Наука, 1991. 200 с.
- Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 168 с.
- Филатов Н.Н., Зайцев Л.В., Науменко М.А. Исследование изменчивости течений и температуры воды оз. Севан // Моделирование и экспериментальное исследование гидрологических процессов в озерах. Л: Наука, 1986. С. 49–54.
- Хасанов Р.Р., Законнов В.В., Иванов Д.В. Геоинформационный анализ структуры и динамики грунтового комплекса Куйбышевского водохранилища // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ. Сб. материалов конф. ИБВВ РАН. Борок, 2012. С. 325–329.
- Цветков А.И., Малина И.П., Чемерис Е.В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА) для изучения высшей водной растительности // Материалы IX Международной научной конференции по водным макрофитам «Гидроботаника 2020» (Борок, Россия, 17–21 октября 2020 г.). Ярославль: Филигрань, 2020. С. 172–175.

- Шашуловская Е.А. Роль мелководий в самоочищении равнинных водохранилищ (на примере Волгоградского водохранилища): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2010. 23 с.
- Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248–254.
- Широков В.М., Лопух П.С., Левкевич В.Е. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 160 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М: Издательство «Перо», 2014. 399 с.
- Эдельштейн К.К. Измерение скоростей движения воды термогидрометром // Материалы по биологии и гидрологии волжских водохранилищ. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 127–131.
- Эдельштейн К.К. Лимнологическая практика. М.: Изд-во МГУ, 1972. 156 с.
- Эдельштейн К.К. Лимнологическая практика. М.: Изд-во МГУ, 1989. 96 с.
- Эдельштейн К.К., Иваненко С.А., Патрик П.А. Пространственная структура ветровых течений в долинном водохранилище // Метеорология и гидрология. 2001. № 7. С. 89–100.
- Экологические факторы пространственного распределения и перемещения гидробионтов / Под ред. А.Г. Поддубного. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 333 с.
- Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009 гг.). Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. 348 с.
- Ярославцев Н.А. Исследования переформирования берегов Горьковского водохранилища // Сб. работ Горьковской, Волжской и Рыбинской ГМО. Вопросы гидрологии. Вып. 12. Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 106–128.
- Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // Water Resources. 2007. Vol. 34, part 1. P. 95–102.
- Baranowska T. Mapping of the chlorophyll content in lake waters on the basis of digital Cosmos-MSUE images // Proc. 11th Earsel. Symp.: EUR.: From sea level to Alpin Peaks, From Iceland to Urals, Graz. Boulogne-Billancourt. 1991. P. 315–317.
- Buttner Gy., Korandi M., Gyomory A., Kote Zs., Szabo Gy. Satellite remote sensing of inland waters: Lake Balaton and reservoir Kiskore // Acta Astron. 1987. Vol. 15. № 6–7. P. 305–311.
- Carlberg S.R., Skarstedt C.B., Determination of small amounts of non-polar hydrocarbons (oil) in sea water // J. Cons. Int. Explor. Mer., 1972. Vol. 34, № 3. P. 506–515.
- Choubey V.K. Monitoring surface water conductivity with Indian remote sensing satellite data: A case study from Central India // Hydrochemistry'1993 Symp. "Hydrol., chem and biol. Processes transform. and transport contamin. aquat. environ.". Rostov-on-Don: IAHS Publ. 1994. № 219. P. 317–326.
- Gerasimov Y.V., Bazarov M.I., Stolbunov I.A., Tsvetkov A.I., Borisenko E.S. Fish distribution in the middle course of a large lowland river under the effect of hydrophysical factors // Inland Water Biology, 2019. Vol. 12, № 1. P. 74–82.
- Gutman G.G. Normalization of multi-annual global AVHRR reflectance data over land surfaces to common sun-target-sensor geometry // Glob. change and space observ.: Symp. A2 Cospar 29th Plen. meet., 1992. Washington: Space res., 1994. Vol. 14. № 1. P. 121–124.
- Hirst D.M. The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria – II. The relationship between the mineralogy and distribution of minor elements // Geochm. Cosmochim. Acta., 1962. Vol. 26. P. 1147.

- Kondratyev K.Ya., Melentyev V.V., Pozdniakov D.V. Application of remote sensing techniques to comprehensive monitoring of inland water ecosystems // Hydrochemistry'1993 Symp. "Hydrol., chem. and biol. processes transform. and transport contamin. aquat. environ", 1993. Rostov-on-Don: IAHS Publ., 1994. № 219. P. 369–374.
- Lark R.M. Contribution of principal components to discrimination of classes of land cover in multi-spectral imagery // Int. J. Remote Sens., 1995. Vol. 16. № 4. P. 779–787.
- Linden P.F. The deepening of a mixed layer in a stratified fluid // J. Fluid. Mech., 1975. P. 385–405.
- Loring D.H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal date // Marine Ghem., 1990. Vol. 29. P. 155.
- Nolte J. Pollution source analysis of river water and sewage sledge // Environ. Technol. Lett., 1988. Vol. 9. P. 857–868.
- Poddubnyi S.A., Kutuzov A.V., Tsvetkov A.I. The structure of currents and water exchange in the overgrowing shallows // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 834 (2021) 012017.
- Rylov S.A., Pestunov I.A. Assessment of lakes areas by Sentinel-2 satellite data // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019. № 12(5). P. 526–535.
- Sakharova E.G., Krylov A.V., Sabitova R.Z., Tsvetkov A.I., Gambaryan L.R., Mamyas A.S., Gabrielyan B.K., Hayrapetyan A.H., Khachikyan T.G. Horizontal and Vertical Distribution of Phytoplankton in the Alpine Lake Sevan (Armenia) during the Summer Cyanoprokaryota Bloom // Contemporary problems of ecology, 2020. Vol. 13. № 1. P. 60–70.
- Shuchman R., Sayers M., Leshkevich G., Lesht B. Great Lakes Remote Sensing. Algorithms Status, Comparisons, and Future Directions. Editor Caren Biding. NASA GLENN Remote Sensing Workshop Cleveland, Ohio March 12–13, 2014. 27 p.
- Soomets T, Uudeberg K, Jakovels D, Brauns A, Zagars M, Kutser T. Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data // Sensors. 2020. Vol. 20. 742.
- Tateishi R., Kajiwara K. Considerations on problems of NOAA GVI data for global land cover monitoring // Geocarto int., 1994. Vol. 2, № 4. P. 5–15.
- Udodenko U.G., Komov V.T., Zakonnov V.V. Long-term dynamics of total mercury in surficial bottom sediments of the Volga River's reservoir in central Russia // Environ Monitoring and Assessment, 2018. Vol. 90, № 4. P. 190–198.
- Wu Q.X., Pairman D., McNeill S.J., Barnes E.J. Computing advective velocities from satellite images of sea surface temperature // IEEE trans. on geosci. and remote sens., 1992. Vol. 30, № 1. P. 166–176.
- QGIS, <https://qgis.org/>.
- https://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/20101119_LDCMbrochure.pdfhttps://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/20101119_LDCMbrochure.pdf.
- <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/hsi-instrument>;
- https://lta.cr.usgs.gov/sentinel_2.
- <https://www.openstreetmap.org/>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ	7
1.1. Выбор сетки гидрологических станций	7
1.2. Определение местоположения станций наблюдений	8
1.3. Измерение глубины на станции	9
1.4. Измерения температуры и электропроводности воды.....	10
1.4.1. Регулярные стационарные наблюдения	10
1.4.2. Пространственные съемки температуры и электропроводности воды	18
1.5. Наблюдения над течениями	21
1.5.1. Метеорологические наблюдения	21
1.5.2. Наблюдения над волнением	23
1.5.3. Измерения параметров течений	24
1.6. Стационарные пункты наблюдений	37
1.7. Определение характеристик донных отложений	38
1.7.1. Направления исследований донных отложений водохранилищ.....	38
1.7.2. Методы сбора и обработки материала по донным отложениям.....	40
1.7.3. Составления балансов взвешенных наносов и биогенных элементов.....	48
1.7.4. Определение содержания взвешенных веществ.....	50
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ	52
2.1. Физико-географическая характеристика бассейна.....	52
2.2. Общая гидрологическая характеристика водоема	52
2.3. Водные массы	59
2.4. Характеристика процессов седиментации в водохранилищах	62
2.4.1. Районирование по условиям осадкообразования, расчет площадей, объемов и темпов седиментации на примере волжских водохранилищ.....	62
2.4.2. Картирование донных отложений с использованием ГИС на примере Куйбышевского водохранилища	67
ГЛАВА 3. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ..	70
3.1. Методы дистанционного зондирования водных объектов.....	70
3.2. Международный целевой комплексный проект «Интеркосмос» – «Внутренние водоемы»	72
3.3. Методы выделения ландшафтов переходной зоны «вода–суша».....	75
3.3.1. Подходы к «топо-экологическому профилированию»	75
3.3.2. Использование данных дистанционного зондирования и их дешифрирование	76
3.3.3. Анализ космоснимков в географической информационной системе	81
3.4. Ошибки методов выделения переходных зон ландшафта.....	85
3.5. Результаты использования данных ДЗЗ, при создании ГИС ландшафтов побережий крупных водохранилищ	85
3.6. Оценка структуры абиотических полей внутреннего водоема по данным дистанционного зондирования.....	88

3.6.1. Мезоструктура абиотических полей на акватории Рыбинского водохранилища по данным дистанционного зондирования	89
3.6.2. Определение температуры воды на поверхности водоема по данным ДЗЗ (современные исследования).....	95
3.6.3. Использование ДЗЗ при картографировании распределения фитопланктона на внутренних водоемах (современные исследования).....	97
3.7. Методы определения степени зарастания озер и мелководий равнинных водохранилищ по данным дистанционного зондирования	100
3.7.1. Спутниковые носители	101
3.7.2. Беспилотные летательные аппараты	104
3.8. Идентификация горизонтальной циркуляции водных масс посредством данных дистанционного зондирования	105
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	112
4.1. Геометрические модели акваторий водохранилищ.....	112
4.1.1. Модель ложа долинного водохранилища	112
4.1.2. Модель устьевой области малой реки	112
4.1.3. Модели защищенных мелководий.....	116
4.2. Расчет температуры воды.....	117
4.3. Моделирование динамики вод в стационарных условиях.....	120
4.3.1. Динамический метод расчета течений	122
4.3.2. Стационарная модель общей циркуляции водных масс	123
4.3.3. Приложение стационарной модели циркуляции водных масс	128
4.4. Нестационарные расчеты гидротермодинамических процессов	133
4.4.1. Бароклинные эффекты в динамике равнинного водохранилища	133
4.4.2. Расчет течений с использованием уравнений теории мелкой воды	134
ГЛАВА 5. ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ.....	138
5.1. Критерии качества воды и необходимость их использования при изучении внутренних водоемов.....	138
5.2. Выбор пунктов наблюдений и исследуемых компонентов химического состава воды	140
5.3. Методы анализа химического состава воды	141
5.3.1. Прозрачность, цветность, рН, растворенный кислород.....	141
5.3.2. Солевой состав воды	143
5.3.3. Органическое вещество	146
5.3.4. Биогенные элементы	148
5.3.5. Загрязняющие вещества.....	151
ГЛАВА 6. УЧЕНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОЛОГИИ И ГИДРОХИМИИ.....	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	189

Научное издание

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ

Ответственный редактор С.А. Поддубный

Подписано в печать 20.03.2024. Формат 60×90 1/16.
Усл. печ. л. 12,88. Заказ № 23139. Тираж 250 экз.

Отпечатано в типографии ООО “Филигрань”
150049, г. Ярославль, ул. Свободы, 91,
pechataet@bk.ru