ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям на водохранилищах для строительства



Москва 1986

gost.e-ecolog.ru

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
(ПНИИИС) ГОССТРОЯ СССР

Рекомендации

по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям на водохранилищах для строительства



Москва Стройиздат 1986

УДК 55148.49.018+551.50

Рекомендованы к изданию решением секции Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям на водохранилищах для строительства / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 132 с.

Содержат описание гидрометеорологических работ, выполняемых при инженерных изысканиях в пределах существующих равнинных водохранилищ. Рассмотрены методы оценки влияния водохранилищ на климат и рельеф прибрежных территорий, методы натурных наблюдений и обработки полученных результатов, а также методы расчета характеристик, требуемых при проектировании сооружений в районах водохранилищ.

Обобщен многолетний опыт ряда организаций, работающих на водохранилищах, озерах и морях.

Для инженерно-технических работников проектно-изыскательских организаций.

Табл. 27, ил. 36.

Р $\frac{3202000000-420}{047(01)-86}$ Инструкт.-нормат., 1 вып. – 38–85

©Стройиздат, 1986

ВВЕДЕНИЕ

Возникающая в процессе хозяйственной деятельности человека потребность в пресных водах, ресурсы которых весьма ограничены, вызывает необходимость их рационального использования. Одним из путей рационального использования поверхностных пресных вод является создание искусственных водоемов с водонапорными сооружениями, что позволяет аккумулировать сток воды и регулировать его потребление в соответствии с нуждами народного хозяйства.

Подобные искусственные водоемы получили название водохранилищ либо прудов. Последние отличаются лишь размерами; условно принято, что к прудам относятся мелководные водохранилища площадью не более 1 км^2.

Большинство водохранилищ располагается по долинам рек, наследуя некоторые их черты. Эти водохранилища называются долинными. Приплотинные зоны их имеют большое сходство с озерами. Еще ближе по своему морфологическому строению и режиму к озерам – водохранилища, занимающие озерные котловины, так называемые озерные водохранилища, а также выкопанные пруды.

Режим водохранилищ, формирующийся под воздействием речного стока и условий эксплуатации аккумулируемых вод, весьма своеобразен. Его основные черты ставят водохранилища как водный объект в промежуточное положение между водотоками и водоемами (реками и озерами). Важнейшее отличие водохранилищ от естественных водоемов и водотоков состоит в том, что их режим в значительной мере контролируется человеком.

В отличие от озер водохранилища имеют более активный водообмен, больший размах колебаний уровня воды, что обусловливает большую изменчивость характеристик водоема (площади водной поверхности, объема и глубины воды). Это в свою очередь накладывает отпечаток на температурный режим, химический состав и мутность воды, а также биологические и другие процессы, протекающие как в водных массах, так и в береговой зоне водохранилища.

Увеличение качества действующих водохранилищ, а также повышение требований к охране природной среды и рациональному использованию водных ресурсов вызывает необходимость при проектировании различных сооружений учета воздействия, оказываемого водохранилищем на природные условия районов строительства. В неменьшей степени подлежат учету также и воздействия, особенно неблагоприятные, которые могут оказывать проектируемые объекты на режим водохранилища в процессе их строительства и эксплуатации.

Возникающие при этом практические задачи по оценке режима водохранилища, определяющего условия, а также надежность эксплуатации проектируемого сооружения, решаются на основе инженерно-гидрометеорологических изысканий. В отличие от природных водных объектов водохранилище как искусственно созданный водоем обладает рядом свойств техногенного характера, обусловливающих особенности состава и методики работ, выполняемых при инженерно-гидрометеорологических изысканиях.

Особенность изучения режима этих водных объемов определяется прежде всего тем, что большинство водохранилищ в нашей стране, прежде всего крупных, не прошло еще стадию приспособления к окружающей природной обстановке. В связи с этим наблюдаются особая неустойчивость, большая активность и разнообразие процессов в самом водохранилище и на прибрежных территориях в зоне влияния водохранилища. При этом большая протяженность водохранилищ и неодинаковый подпор уровней по длине водоема способствуют неоднородности одновременно развивающихся в нем процессов.

Следует отметить также, что эксплуатация крупных водохранилищ носит, как правило, комплексный характер, что обусловлено одновременным участием в ней ряда отраслей народного хозяйства, таких, как гидроэнергетика, водный транспорт, ирригация, рыбное хозяйство и др. Интересы этих отраслей в использовании водохранилищ не только не совпадают, но и нередко противоречивы. Все это находит отражение в режиме водохранилища, изучение которого, по сравнению с естественными водоемами, тем более установление расчетных характеристик, представляет собой весьма сложную задачу.

Процессы и явления, протекающие как в самих водохранилищах, так и в зоне их влияния, далеко не всегда могут расцениваться как положительные; часто однозначная оценка их затруднена. Неблагоприятное воздействие водохранилищ проявляется, например, в заилении чаши водохранилища, переработке берегов и образовании аккумулятивных форм, подтоплении и засолонении прилегающих земель, "цветении" воды и др. Все это затрудняет строительство и эксплуатацию сооружений, располагаемых на прибрежных территориях и на самих водохранилищах, вынуждает нередко осуществлять специальные дорогостоящие защитные мероприятия.

Методика производства наблюдений при изучении гидрометеорологического режима водохранилищ установлена Госкомгидрометом СССР и изложена в "Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам", вып. 7, ч. 1 "Гидрологические наблюдения на озерах и водохранилищах" (Л., Гидрометеоиздат, 1974).

Госкомгидрометом СССР периодически издаются методические указания, а также рекомендации и пособия по вопросам изучения режима водохранилищ. Постановлением Совета Министров СССР от 10 октября 1957 г. № 1195 определено, что все министерства и ведомства, выполняющие работы в области гидрологии и метеорологии независимо от их цели и назначения должны следовать методическим указаниям по их производству, устанавливаемых Госкомгидрометом СССР.

Вытекающие из этого постановления требования, а также осуществляемая Госстроем СССР единая техническая политика в капитальном строительстве обязывает выполнять инженерно-гидрометеорологические изыскания на водохранилищах для целей строительства на основе единой методической базы. Единственным методическим документом, действующим в инженерно-гидрометеорологических изысканиях на правах строительных норм, является Наставление Госкомгидромета СССР, определяющее методику проведения наблюдений и отдельных измерений при изучении режима водохранилищ и озер. Однако составленное для сети гидрометеорологических станций и постов Госкомгидромета СССР, имеющих целью длительное изучение режима, оно не в полной мере отражает особенности производства гидрологических работ при инженерных изысканиях, осуществляемых в течение весьма ограниченного времени.

Состав инженерно-гидрометеорологических изысканий, выполняемых при строительстве объектов народного хозяйства на берегах водохранилища либо на акватории, зависит от назначения объекта, а также от характера влияния водохранилища на строительство и условиях эксплуатации сооружения. Этот состав определяется для различных видов строительства соответствующими документами:

Инструкция для городского и поселкового строительства (СН 211-62);
Инструкция для промышленного строительства (СН 225-79);
Инструкция для линейного строительства (СН 234-62).

Наряду с ними действуют ведомственные нормативные документы, устанавливающие состав инженерных изысканий для других видов строительства.

Различие в составе инженерно-гидрометеорологических изысканий, выполняемых для того или иного вида строительства сооружений, можно видеть из следующих примеров.

При размещении объектов промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и других видов строительства на берегах водохранилищ в процессе инженерно-гидрометеорологических изысканий решается задача оценки инженерно-гидрологических условий эксплуатации этих объектов, а при необходимости – инженерной защиты их от неблагоприятных воздействий водного объекта. В состав инженерно-гидрометеорологических изысканий могут быть включены: наблюдения за уровнями воды и ледовыми явлениями, волнением, течениями, переработкой берегов и динамикой прибрежных наносов.

При решении задач, связанных с водоснабжением или выпуском сточных вод в водохранилище, дополнительно могут проводиться наблюдения за химическим составом и санитарным состоянием воды, мутностью и температурой воды, развитием водной растительности.

Для сооружения объектов линейного строительства, пересекающих водоем, дополнительно к задаче их инженерной защиты в прибрежной зоне решаются вопросы изучения рельефа дна и его изменения в открытой части водоема в течение срока службы сооружений.

Состав инженерно-гидрометеорологических изысканий на водохранилищах зависит также и от состояния изученности водного объекта. При достаточной его изученности данные наблюдений на гидрометеорологической станции (посту) могут быть перенесены на участок строительства с обязательным учетом репрезентативности по каждому элементу режима.

При коротком ряде наблюдений на ближайшем пункте Госкомгидромета СССР либо недостаточной его репрезентативности на участке строительства намечается проведение комплекса наблюдений в составе, позволяющем осветить инженерно-гидрологические условия изучаемого участка. Расчетные характеристики режима водохранилища устанавливаются в этом случае по связи результатов кратковременных наблюдений с многолетними наблюдениями на станции (посту) – аналоге.

При определении состава инженерно-гидрометеорологических изысканий следует иметь в виду, что ответ на ряд вопросов, связанных, например, с прогнозом переработки берегов, вдольберегового перемещения наносов, течений, санитарного состояния водоема, может быть получен только на основе натурных наблюдений на изучаемом участке.

При производстве изысканий особое значение придается поиску и анализу уже имеющихся материалов (в первую очередь материалов Госкомгидромета) и полевым экспресс-методам изучения гидрометеорологической обстановки. Одной из важнейших задач полевых изысканий является получение исходных данных для эмпирико-теоретических расчетов. Большое значение имеет определение оптимальной степени детальности и продолжительности полевых изыскательских работ для освещения неоднородности в пространстве и изменчивости во времени гидрометеорологических условий.

Некоторые гидрометеорологические наблюдения должны проводиться непрерывно или эпизодически (в различные сезоны или при различных режимах работы гидроузлов) в течение ряда лет, поэтому их стремятся организовать заблаговременно. По материалам первого года можно предварительно устанавливать причинные связи между различными явлениями, уточняя и дополняя выявленные закономерности в последующие годы. В итоге появляется возможность оценить как суммарное воздействие различных процессов за расчетный период, так и их влияние в экстремальных состояниях на проектируемое сооружение.

Частота и продолжительность наблюдений в районе изысканий за отдельными элементами гидрометеорологического режима водохранилищ связаны со спецификой решаемых практических задач и зависят от репрезентативности данных ближайших наблюдательных пунктов Госкомгидромета СССР.

Рекомендации касаются методов изучения и оценки на равнинных водохранилищах следующих гидрометеорологических процессов и явлений: уровня, температуры и химического состава воды, волнения, течений, ледовых явлений, движения и отложения наносов, а также влияния водохранилищ на побережье, что проявляется в размыве берегов, изменении микроклимата и т.п. Отдельно рассмотрены геодезические и аэрофотосъемочные методы, так как они применяются при изучении различных сторон природной обстановки на водохранилищах.

Рекомендации рассчитаны на инженерно-технический персонал, выполняющий полевые и камеральные работы, составляющий гидрометеорологическое обоснование для проектов строительства на существующих равнинных водохранилищах и знакомый с нормативной и другой справочной литературой в данной области знаний.

Рекомендации отчасти могут быть использованы также при изысканиях на равнинных реках и особенно на озерах.

Рекомендации подготовлены ПНИИИС (кандидаты геогр. наук Л.Б.Иконников – введение пп. 10.1–10.14, прил. 3, М.Н.Костяницын – введение; канд.техн. наук А.Ф.Крашников – введение; инженеры В.П.Пичугин – п. 10.15, Г.А.Родичева – п. 1.1) при участии: Лаборатории аэрометодов Министерства геологии СССР (канд. геогр. наук Ф.С.Зубенко – пп. 12.1–12.29); СибНИИЭ (кандидаты геогр. наук Л.Н.Каскевич – разд. 2, пп. 4.5, 8.4, 8.8–8.13, Ю.В.Титова – пп. 1.2–1.4, И.С.Сергеенков – п. 2.7, инж. А.Ш.Хабидов – п. 8.4, разд. 9, пп. 11.3–11.6); Горьковской гидрометеорологической обсерватории Верхне-Волжского управления ГКС (канд. техн. наук В.И.Колкуткин – п. 1.5, разд. 5.6); Горьковского инженерно-строительного института (канд. техн. наук О.А.Мозжухин – пп. 11.1, 11.2, 11.7, 11.9, прил. 2); Института земной коры Сибирского отделения АН СССР (канд. геол.-минер. наук Г.М.Пуляевский – пп. 4.1–4.4, 9.9, 11.8; инж. Г.И.Овчинников – пп. 8.1 – 8.3, 8.5 – 8.8); Ленинградского государственного университета (канд. геогр. наук. Ю.Д.Шариков – пп. 12.30 – 12.42 прил. 1); Московского государственного университета (канд. геогр. наук К.К.Эдельштейн – разд. 7); Иркутской гидрометеорологической обсерватории Иркутского управления ГКС (инж. Н.Н. Янтер – разд. 3).

Научное редактирование настоящих Рекомендаций выполнено Л.Б.Иконниковым.

1. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

1.1. Создание водохранилища приводит к увеличению площади водного зеркала, объема водной массы и изменению глубин. Физические свойства водной поверхности значительно отличаются от свойств поверхности суши, что обусловливает формирование в районе водохранилища особого метеорологического режима.

Для разработки проектов строительства в районах водохранилищ обычно используется метеорологическая информация, получаемая метеорологическими станциями Госкомгидромета. Данные наблюдений этих станций публикуются в метеорологических ежегодниках и ежемесячниках, в Справочниках по климату СССР и в других изданиях Госкомгидромета.

Метеостанции расположены сравнительно редко и не всегда могут надлежащим образом осветить метеорологические условия района или участка предполагаемого строительства. Поэтому в отдельных случаях приходится проводить дополнительные наблюдения. В зависимости от поставленных задач могут выполняться следующие виды метеорологических работ:

1) стационарные наблюдения за основными элементами метеорологического режима на временных постах;

2) экспедиционные микроклиматические наблюдения, проводимые по определенным маршрутам и профилям;

3) специальные наблюдения (например, в связи с изучением водного или теплового баланса, размыва берегов).

Стационарные наблюдения организуются прежде всего, так как для проектных разработок бывают необходимы данные за ряд годовых циклов. Эти наблюдения проводятся по стандартной методике в соответствии с Наставлениями для гидрометеорологических станций и постов Госкомгидромета. Непременным условием является синхронность сроков наблюдений со сроками наблюдений по ближайшим метеостанциям Госкомгидромета, а также применение однотипных приборов. Это дает возможность оценить сходимость результатов наблюдений в районе изысканий и на метеостанциях и в некоторых случаях уже в самом начале добиться сокращения объема дополнительных наблюдений или прекратить их вообще.

Для обработки материалов стационарных многолетних наблюдений по метеостанциям и временным постам и получения метеорологических параметров, необходимых для проектирования, используются статистические методы.

При наличии ограниченного состава наблюдений, которые не могут быть непосредственно распространены на район строительства, для оценки метеорологических условий привлекаются данные по изучаемому району, который может быть взят в качестве аналога.

Ориентировочные показатели метеорологических условий для района проектируемого строительства могут быть получены применением метода районных обобщений. Этот метод заключается в районировании изучаемой территории по расчетным параметрам, определяемым на основе имеющихся стационарных наблюдений Госкомгидромета.

Наиболее сложной задачей метеорологических изысканий является оценка микроклимата, формируемого под воздействием водохранилища. Для ее рашения рекомендуется использовать следующие методы:

1) географических аналогий;

2) расчетный, основанный на решении уравнений турбулентного влаго- и теплообмена в призменном слое воздуха;

3) пространственных разностей многолетних метеорологических показателей по данным метеостанций, расположенных на различном удалении от водоема;

4) экспедиционных наблюдений.

1.2. Метод географических аналогий позволяет, используя данные, полученные на водохранилищах-аналогах, оценивать возможные микроклиматические изменения в зоне влияния исследуемого водохранилища. Этот метод предусматривает наличие хотя бы редкой сети метеорологических станций. Выбор водохранилища-аналога производится на основе различных критериев подобия (морфометрических, климатических, ландшафтных и др.)

К морфометрическим критериям подобия относятся длина и площадь водохранилища, наибольшая ширина, максимальная и средняя глубина. Все сравниваемые характеристики по водохранилищу определяют при НПУ (нормальный подпорный уровень). В качестве климатических критериев подобия используются данные о температуре и влажности воздуха, осадках, скорости и направлении ветра, продолжительности безморозного периода. При ландшафтной характеристике учитываются геологические условия, климатическая и растительная зона.

Все показатели представляются в табличной форме для водохранилища-аналога и для изучаемого водохранилища.

1.3. После выбора водохранилища-аналога переходят к непосредственной оценке изменения микроклимата под влиянием водохранилища, используя метод пространственных разностей.

Расчет производится по нескольким парам метеорологических станций. Одна из станций в каждой паре расположена в зоне влияния водохранилища, другая – на значительном расстоянии от уреза водохранилища. Подсчет производится по следующей формуле:

$$\partial \Delta N = \Delta N - \Delta N', \qquad (1)$$

где ΔN и $\Delta N'$ – разность среднемесячных величин метеоэлементов между береговой и континентальной станциями соответственно после и до строительства водохранилища.

Величина $\partial \Delta N$ определяет характер влияния водохранилища на тот или иной климатический показатель на различном удалении от водохранилища. По ее изменению можно судить о характере влияния водохранилища в различные сезоны года.

По аналогичной схеме в зависимости от задачи пространственные разности подсчитываются для средних месячных, суточных, дневных и ночных величин, суточных амплитуд, абсолютных месячных максимумов различных метеоэлементов.

Для использования этого метода необходимы:

выбор профиля, в направлении которого проводятся расчеты;

достаточная метеорологическая освещенность по этому профилю;

данные метеорологических наблюдений в течение ряда лет как до создания водохранилища, так и после.

Расчеты проводятся для периода открытой воды по месяцам с целью установления наибольшего и наименьшего влияния водохранилища.

Полученные данные переносятся на изучаемое водохранилище, находящееся в сходных природных условиях.

Метод пространственных разностей исключает влияние общих изменений климата, не связанных с созданием водохранилища.

1.4. В целях получения дополнительных данных, особенно при недостаточной освещенности метеорологическими наблюдениями изучаемого района, применяется метод экспедиционных наблюдений – приборные микроклиматические съемки. Микроклиматические исследования для целей строительства следует начинать с глазомерной микроклиматической оценки местности. Задачей этой съемки является оценка особенностей местности, в ос-

новном по рельефу и растительности, перед выбором места для инструментальной съемки.

Глазомерная микроклиматическая съемка позволяет лишь качественно оценить влияние подстилающей поверхности и форм рельефа на образование микроклиматических особенностей местности. Обследование производится по маршрутам, намеченным так, чтобы охватить все основные особенности рельефа и распределения растительности в исследуемом районе.

Основными требованиями, предъявляемыми к микроклиматическим съемкам, являются:

репрезентативность микропрофилей, выбранных для характерных участков водохранилища;

однородность используемой аппаратуры и ее установки;

синхронность наблюдений.

На основании предварительно проведенных глазомерных оценок местности выбирается место для закладки профиля для проведения микроклиматических съемок, чтобы отразить микроклиматические особенности исследуемой территории. Места заложения профилей можно, учитывая значительные объемы изыскательских работ, совмещать, например, с участком наблюдений за устойчивостью склонов, если этот участок является репрезентативным. Общая протяженность профиля не должна быть менее 0,5–1 км (желательно 2–5 км), так как в пределах этой зоны строятся жилые поселки, дома отдыха, санатории.

Микроточки для наблюдений на профиле располагаются в 5, 50, 100, 300, 500, 700, 1000 м и т.д. от уреза в глубь суши, на характерных элементах рельефа и типах растительности,

Микроклиматические наблюдения необходимо проводить при разных типах погоды, так как в зависимости от типа погоды микроклиматические особенности местности могут проявляться очень четко или не проявляться вообще.

Основными типами погоды, при которых проводятся микроклиматические наблюдения, являются:

ясно (облачность от 0 до 2 баллов, ветер от 0 до 2 м/с и $\leqslant$ 3 м/с);

пасмурно (облачность от 8 до 10 баллов, ветер от 0 до 2 м/с и $>$ 3 м/с).

Каждая наблюдательная точка наносится на план участка и описывается ее местоположение согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Краткая характеристика местоположения точек на профиле	Высота, мБС	Превышение над урезом, м	Расстояние от уреза, м	Ориентировка профиля
Урез. Пологий залесенный склон пятой надпойменной террасы	234	0	0	ЮВ-СЗ
Пологий склон пятой надпойменной террасы	249	15	194	ЮВ-СЗ

Наблюдения рекомендуется проводить по сокращенной программе, включающей небольшой объем простых измерений температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра.

При проведении наблюдений используются аспирационный психрометр М-34, регистрирующий температуру воздуха; ручной анемометр для регистрации скорости ветра и компас с вымпелом для фиксации направления ветра.

В случае малого количества наблюдателей и необходимости получения метеорологических характеристик за любой срок целесообразно проводить

наблюдения с помощью суточных самописцев: термографа, гигрографа и контактного анемометра М-25, регистрирующее устройство которого (регистратор М-97) предназначено для одновременной регистрации скорости ветра, измеренной с помощью шести анемометров.

При проведении микросъемок контактный анемометр также позволяет регистрировать скорость ветрового потока путем непрерывной записи в течение суток на одной стоянке. С этой целью через полный оборот барабана (4 ч) включается последующее перо регистратора. Питание регистратора осуществляется от батареи из трех элементов 1,2 НВМЦ – 525.

Обработка записей производится в соответствии с работой Стернзата.

Приборы устанавливаются на специальных подставках.

Установка оборудована защитным тентом от воздействия прямых солнечных лучей.

При невозможности обеспечения всех микроточек достаточным количеством наблюдателей проводятся маршрутные микроклиматические наблюдения. При этом должна быть обеспечена синхронность наблюдений.

При составлении графика маршрутных микроклиматических съемок необходимо учитывать время перехода с одной точки на другую. Перед началом наблюдений проводится полевая проверка приборов согласно прилагаемой к ним инструкции.

Данные показаний по приборам записываются в специальный журнал. Сроки наблюдений соответствуют стандартным шестисрочным.

За пять минут до срока в наблюдательной книжке следует записать состояние погоды (облачность, состояние диска солнца, направление ветра, атмосферные явления). За три минуты смочить термометры психрометров и завести их, записать показания анемометров. Точно в срок пустить анемометры и через десять минут выключить. Отсчеты по психрометру берутся три раза за 10-минутную серию; после первого отсчета психрометры подзаводятся.

Первичную обработку микроклиматических наблюдений в наблюдательских книжках необходимо проводить в полевых условиях. Обработка лент самописцев производится соответственно изложенному в работе Стернзата М.С.

Оценка степени влияния водохранилища на прибрежную территорию определяется путем нахождения разностей показателей метеорологических элементов на побережье на урезе.

1.5. Специальные метеорологические наблюдения над водной поверхностью необходимы при выполнении ряда расчетов (испарения с поверхности водохранилища, температуры воды и т.д.).

Значения метеорологических характеристик, полученные на прибрежной метеостанции даже в непосредственной близости от уреза воды, не соответствуют значениям подобных характеристик над водной поверхностью. Причина этого заключается в воздействии подстилающей поверхности (ее шероховатости, температуры и др.) на метеохарактеристики воздушной массы. Величина трансформации воздушной массы определяется устойчивостью и скоростью перемещения воздушной массы, сезоном года.

Существующие методы пересчета значений упругости водяного пара, температуры воздуха и скорости ветра, измеренных на суше, к их значениям над водной поверхностью предусматривают введение поправочных коэффициентов или же использование эмпирических и полуэмпирических расчетных формул или графиков. Однако эти методы не всегда дают достаточно удовлетворительные результаты для каждого конкретного водохранилища, особенно со своеобразными гидролого-морфологическими условиями. В таких случаях требуется постановка специальных наблюдений за метеорологическими элементами над водной поверхностью, которые позволили бы уточнить значения поправочных коэффициентов или расчетных формул.

Такие наблюдения предусматривают синхронные измерения комплекса метеорологических элементов на существующей береговой станции, урезе

[1] Стернзат М.С. Метеорологические приборы и наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 463 с.

воды и над водной поверхностью с имеющихся плавсредств, установленных на расстоянии 50, 100, 200, 500, 1000 и 2000 м от уреза воды. Возможны и другие варианты выбора мест установки плавсредств, которые определяются необходимой детальностью решения задачи.

Наблюдения на всех выбранных точках производятся обычно через получасовые интервалы времени в течение полусуток или суток. Подобные циклы наблюдений проводят неоднократно для охвата разнообразных метеорологических ситуаций. Разумеется, наблюдения должны проводиться в различные сезоны года, за исключением зимы, когда значения метеорологических элементов над побережьем и покрытой льдом поверхностью водохранилища практически одинаковы.

Оборудование плавсредств для выполнения метеорологических наблюдений производится в соответствии с типом судна, но при этом необходимо соблюдение ряда общих положений.

Упругость водяного пара и температуру воздуха измеряют при помощи аспирационного психрометра, установленного на высоте 2 м от водной поверхности. Целесообразно психрометр, а также анемометр, используемый для измерения скорости ветра, располагать на поворотной выносной стойке, которая позволяет избежать искажающего влияния судна. Наблюдения необходимо производить только с наветренного борта судна, в той его части, где имеется наименьшее количество надстроек.

Методика проведения наблюдений излагается в действующих Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам.

Расчет температуры воздуха и упругости водяного пара при переходе воздушной массы с суши на водохранилище производится по следующим зависимостям:

для температур воздуха $T_x = T + (T_n - T) F_t$; (2)

для упругости водяного пара $e_x = e + (e_n - e) F_e$, (3)

где T_x и e_x – температура воздуха и упругость водяного пара на высоте 2 м над водной поверхностью; T и e – температура воздуха и упругость водяного пара над сушей по данным береговой станции; T_n и e_n – температура поверхности воды и максимальная упругость водяного пара при температуре поверхности воды; F_t и F_e – функции, учитывающие изменение величин T и e над водохранилищем.

Значения величин F_t и F_e определяются по следующим зависимостям:

для температуры воздуха $F_t = 1 - 1{,}33 / X^n$; (4)

для упругости водяного пара $F_e = 1 - 1{,}50 / X^n$, (5)

где X – половина пути, пройденного воздушной массой над водохранилищем по направлению ветра, м; n – величина, косвенно характеризующая устойчивость воздушной массы над водохранилищем (при инверсионных условиях $n = 1/7$, при равновесных $n = 1/10$, при сверхадиабатических $n = 1/13$).

Устойчивость приводного слоя выражается следующим показателем:

$$\frac{\Delta T}{U^2} = (T_n - T) / U_{200}^2, \quad (6)$$

где T_n и T – температура поверхности воды и температура воздуха над сушей; U – скорость ветра над водной поверхностью на высоте 2 м.

В качестве критериев устойчивости можно принять следующие значения:

при инверсионных условиях ... $\Delta T / U^2 < -0{,}1$;

" равновесных "... $+0{,}1 \geq \Delta T / U^2 \geq -0{,}1$;

" сверхадиабатических "... $\Delta T / U^2 > +0{,}1$.

Для ориентировочного расчета искомых значений T_x и e_x можно использовать изложенную выше методику.

Однако для выявления характера влияния на характеристики воздушной массы конкретного водохранилища или его отдельных участков рекомендуется построение зависимостей типа $T_x - T = f(T_n - T)$ и $e_x - e = f(e_n - e)$ по данным непосредственных наблюдений над водной поверх-

ностью. Полученные кривые связи можно выразить аналитически для различных критериев устойчивости воздушной массы.

Обычно получаются расчетные уравнения:

для температуры воздуха $T_x = T + a(T_n - T) \pm b$; (7)

для упругости водяного пара $e_x = e + a(e_n - e)^b$; (8)

где a и b – эмпирические величины. Полученные формулы рекомендуется использовать для расчета среднедекадных и среднемесячных значений T_x и e_x.

Аналогичным способом решается задача определения T_x и e_x при направлении перемещения воздушной массы с водохранилища на сушу, но при этом следует иметь в виду, что функции F_t и F_e в этом случае имеют другие значения. Это определяет необходимость построения иных зависимостей типа:

$$T_x - T = f(T_n - T), \quad e_x - e = f(e_n - e).$$

Расчет среднемесячных или среднедекадных значений температуры воздуха $\bar{T}_x$ или упругости водяного пара $\bar{e}_x$ по данным наблюдений на береговых станциях с учетом трасформации воздушной массы рекомендуется производить по следующим формулам:

$$\bar{T}_x = (T_x m_c + T_x m_в)/(m_c + m_в), \quad (9)$$

$$\bar{e}_x = (e_x m_c + e_x m_в)/(m_c + m_в), \quad (10)$$

где m_c и $m_в$ – число случаев направлений ветра соответственно с суши на водоем или с водоема на сушу за декаду или месяц, по данным береговой станции.

Скорость ветра над водохранилищем $V_в$ связана со скоростью ветра V_c, с измеренной на береговой станции, следующим соотношением:

$$V_в = K V_c, \quad (11)$$

где K – переходный коэффициент, который зависит от стратификации приземного и приводного слоев воздуха, сезона года и времени суток, а также имеет различные значения для направления ветра с суши на водохранилище и с водохранилища на сушу.

Исследования показывают, что максимальное значение коэффициента K в течение суток наблюдается от 2 до 4 ч, минимальное – от 14 до 16 ч. В период, когда водохранилище свободно ото льда, коэффициент постепенно возрастает от весны к лету, достигая максимальных значений в июле–августе, а затем постепенно уменьшается до момента установления ледостава. С увеличением скорости ветра значение коэффициента K уменьшается.

Столь большая изменчивость коэффициента K показывает необходимость проведения параллельных наблюдений за скоростью ветра над водной поверхностью и прибрежной зоной в различное время суток, сезоны года и при различных гидрометеорологических условиях.

2. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА УРОВНЯ ВОДЫ

Общие положения

2.1. Уровень – высота водной поверхности в данной точке, свободная от влияния ветровых волн и измеряемая относительно условного горизонта – "нуля графика" или "нуля поста". Ход уровня на водохранилищах характеризует изменение запасов воды в зависимости от динамики естественного водного баланса и регулирования стока. По акватории водохранилищ различия в уровенном режиме определяются также морфометрическими

особенностями. При этом основная часть водохранилищ озеровидной формы характеризуется близкой к горизонтальной поверхностью, а на речных (долинных и русловых) водохранилищах – периодически изменяющимся уклоном.

В ходе уровня в различных районах постоянного подпора выделяются: плавный подъем в период весеннего наполнения водохранилища, стабилизация в период летней межени, характеризуемая согласными изменениями уровня в разных частях, и сработка в период осенне-зимней межени. В безледный период наблюдается "искажение" хода уровня за счет ветровой денивеляции. На глубоководных водоемах денивеляции составляют всего 10–15 см, на неглубоких и значительных по площади водохранилищах они достигают одного и более метров. Причиной изменения согласного хода уровня могут быть также неравномерная работа агрегатов ГЭС и забор воды на шлюзование, сейшевые колебания, возникающие вследствие разницы атмосферного давления над акваторией.

Для решения практических задач наибольший интерес представляет изучение колебаний уровня, обусловленных изменением запасов воды в водохранилище. Такие колебания характеризуют режим, так называемый "режим уровня" или "уровенный режим".

2.2 Для оценки уровенного режима водохранилищ используются следующие характеристики:

средние уровни за месяц, год, за многолетний или навигационный периоды;

экстремальные (максимальные и минимальные) уровни за месяц, год, многолетний или навигационный периоды;

повторяемость и обеспеченность высоких и низких уровней за год, многолетний или навигационный периоды;

повторяемость и обеспеченность срочных (ежечасных) уровней за месяц, год, многолетний или навигационный периоды;

величина колебаний уровня (суточная, месячная, годовая, многолетняя);

повторяемость величин ветровых денивеляций по месяцам;

продолжительность стояния высоких уровней (средняя и максимальная) при отдельных подъемах;

продолжительность стояния низких уровней (средняя и минимальная) при отдельных спадах;

уровни начала осеннего ледохода и ледостава, первой подвижки и весеннего ледохода (в устьях рек и в верховьях водохранилищ).

Перечисленные характеристики уровня должны быть получены для среднего и преобладающего режимов. Кроме того, необходима хронологическая запись колебаний уровня.

Оборудование и методика наблюдений

2.3. Наблюдения над уровнем воды осуществляются на водомерных пунктах (постах), оборудованных сваями (рейками) или устройствами для непрерывной регистрации колебаний уровня (самописцы типа "Валдай", ГР-38). Наибольшие и наименьшие значения уровня на водомерном пункте, где нет самописцев, фиксируются максимально-минимальными рейками. Описание реек и свай и способов их установки дается в соответствующих Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам.

Водомерные пункты должны располагаться в местах, имеющих свободное сообщение с водоемом при любом положении уровня воды и защищенных от сильного волнения, дрейфующих льдов, от размыва и значительных отложений наносов.

Местоположение и конструкцию сооружений и оборудования на них необходимо согласовать с местными организациями Госкомгидромета.

2.4. Для определения и проверок высотного положения "нуля поста" оборудуются на местности репера, привязанные к Государственной невелирной сети (к исходному реперу) предприятием ГУКа. Для проверки высоты

рабочего репера служит основной репер, а рабочий необходим для систематических определений нивелированием высотных отметок нулей реек и свай.

Устройства водомерного пункта нивелируются по IУ классу точности от основного репера через рабочий двойным ходом (прямое и обратное направления). Расхождения сумм превышений по прямомому и обратному ходу должны находиться в пределах $\pm 5\sqrt{n}$, где n – число стоянок инструмента за один ход. Контрольное нивелирование водомерного пункта должно производиться не реже двух раз в год.

В случае невозможности геометрического нивелирования отметки "нуля постов" могут передаваться от пункта к пункту водным нивелированием, точность которого оценивается по наибольшим среднеквадратическим ошибкам при вычислении по уровням:

среднегодовым $\sigma_{\Delta H} = \pm 4/\sqrt{n}$, см; (12)

среднемесячным $\sigma_{\Delta H} = \pm 9{,}5/\sqrt{n}$, см; (13)

среднесуточным $\sigma_{\Delta H} = \pm 21{,}6/\sqrt{n}$, см, (14)

где n – число членов ряда.

Лучше всего брать среднемесячные уровни с большим рядом наблюдений ($n \geq 25$ лет).

При наличии данных по опорному пункту А высота "нуля поста" в пункте Б может быть получена с учетом вычисления среднеквадратической ошибки по следующей формуле:

$$\sigma_{\Delta\bar{H}} = \pm \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta H - \Delta\bar{H})^2}{n(n-1)}}, \qquad (15)$$

где ΔH – разность синхронных уровней в пунктах А и Б; $\Delta\bar{H}$ – средняя разность уровней в тех же пунктах за весь ряд; n – число членов ряда.

Высота ветрового нагона Δh принимается, как правило, по натурным наблюдениям, а при отсутствии их может приближенно определяться по формуле , не учитывающей конфигурацию береговой линии и уклоны дна:

$$\Delta h = 2 \cdot 10^{-6}(W^2 X / gH)\cos\alpha_\beta, \qquad (16)$$

где W – расчетная скорость ветра, м/с; X – протяженность охваченной ветром акватории, м; принимается максимальная длина разгона при господствующем ветре (активные румбы); α_β – угол между продольной осью водоема и направлением ветра, град.

2.5. Состав и сроки наблюдений на водомерном пункте изложены в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам (вып. 9, ч. 1, 1968 г.). Точность наблюдений за уровнем воды должна быть 1–2 см. Наблюдения на водомерных пунктах в месте изысканий должны охватывать все характерные фазы и не менее 60% величины возможных колебаний уровня в опорном пункте, поскольку связи между уровнем в исследуемом районе и опорном пункте.

Параллельно с наблюдениями за уровнем должны осуществляться наблюдения за ветром, температурой воды, ледовыми явлениями и толщиной льда.

Результаты наблюдений за уровнем записываются на месте производства наблюдений в книжки КГМ-1, приведенные в Наставлении.

Статистическая обработка результатов наблюдений

2.6. Исходными материалами, кроме непосредственных наблюдений на стационарных постах, оборудованных в соответствии с требованиями, изложенными в Наставлении, служат данные таблиц ТГМ-1М, помещаемые в ежегодниках, регулярно издаваемых Госкомгидрометом, или хранящиеся в его фондах.

Случайные ошибки при обработке материалов по уровням уменьшаются при увеличении числа сроков и периода осреднения. Наиболее надежные среднесуточные уровни получаются при обработке ежечасных или четырехсрочных (через каждые 6 ч) наблюдений.

В безледный период по графикам хронологического хода срочного уровня следует установить, не приходятся ли на пропущенные сроки, судя по скорости и направлению ветра, экстремальные уровни. Если во время пропусков наблюдений за уровнем были случаи штормов, то вычислений средних месячных уровней производить не следует.

2.7. Вычисление средних значений уровня сводится к определению за n -летний ряд наблюдений (по срочным данным) среднемесячных, среднегодовых и среднеарифметических значений и к построению хронологических графиков хода уровней (среднесуточных, среднемесячных, среднегодовых). Расчеты не требуют пояснений.

Построение хронологических графиков изложено в Руководстве[1].

Целесообразно остановиться на получении указанных выше характеристик с принятыми допущениями и отклонениями, а именно – на оценке математического ожидания уровня $\bar{H}_0$ с доверительным интервалом ε:

$$\bar{H}_0 = \bar{H} \pm \varepsilon, \tag{17}$$

где $\bar{H}$ – среднеарифметическое значение уровня из ряда n.

Длина ряда в годах, необходимая для расчета среднего уровня с заданной точностью, определяется по формуле

$$n = \sigma_H^2 / \Delta \bar{H}^2 365\, c, \tag{18}$$

где σ_H – среднеквадратическое отклонение, см; $\Delta \bar{H}$ – точность вычисления среднего значения, см; c – число сроков наблюдений в сутки.

В свою очередь ε определяется по формуле

$$\varepsilon = t_\alpha \sigma_H / \sqrt{n}, \tag{19}$$

в которой среднеквадратическое отклонение исследуемого ряда рассчитывают по выражению

$$\sigma_H = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (H_i - \bar{H})^2}{n}}, \tag{20}$$

а критерий Стьюдента t_α определяется по таблице[2].

Для решения практических задач нередко необходимо знать уровень воды в любой точке и средний уровень для всего водохранилища, при этом фазы режима и степень заполнения водоема могут быть самыми различными.

---

[1] Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. – М.: Гидрометеоиздат, 1973.

[2] Табл. 1.1 в Руководстве по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях . – М.: Гидрометеоиздат, 1973.

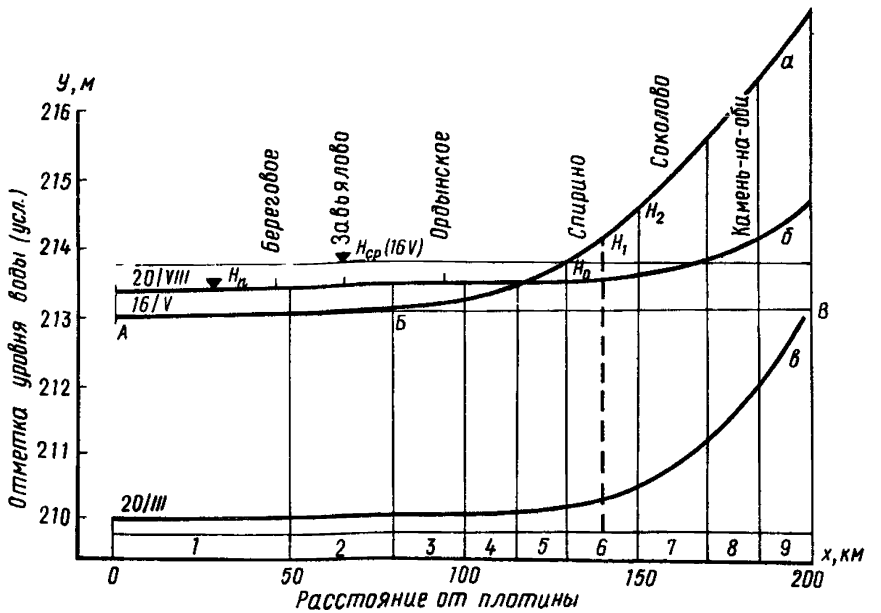


Рис. 1. Схема к расчету среднего уровня
а, б, в – кривые свободной поверхности соответственно в период наполнения, при отметке НПУ и перед наполнением (Новосибирское водохранилище)

Сибирским НИИ энергетики МЭиЭ СССР (И.С.Сергеенков) предложен комбинированный графоаналитический способ расчета таких уровней с использованием кривой свободной водной поверхности и соответствующих уравнений.

Кривая свободной водной поверхности строится по данным о расстояниях между водомерными постами (ось *X*) и значениями уровня на них (ось *У*) на момент расчета (рис. 1). Кривую рекомендуется строить в масштабе, позволяющем снимать значения уровня воды в любой точке с точностью до 1 см.

Средний уровень для характерных участков или водоема в целом находится следующим образом. На оси *X* проводятся границы однородных по морфометрии участков. Для участков, где ход уровня подчиняется линейной зависимости, среднее значение уровня находится как среднее арифметическое по формуле

$$\bar{H} = (H_н + H_к)/2 , \qquad (21)$$

где $H_н$ и $H_к$ – величина уровня в начале и конце участка.

Для участков, где ход уровня нелинеен, средние его значения находятся по формуле

$$\bar{H} = (H_н + 4H_с + H_к)/6 , \qquad (22)$$

где $H_н$, $H_с$, $H_к$ – значения уровней в начале, середине и конце участка.

Вычислив средние уровни на каждом участке, можно определить среднее значение уровня воды для всего водоема. С этой целью по частным кри-

вым объемов воды $W_i = f(H_i)$ находится объем на каждом участке по вычисленным для них средним уровням. Общий объем водохранилища находится как сумма частных объемов

$$W = \sum_{i=1}^{n} W_i . \qquad (23)$$

Определив его и используя общую кривую объемов, находят средний уровень.

Для нахождения уровня в период ветровой денивеляции при распространении волнения вдоль берега (наиболее часто встречающийся случай) предварительно следует произвести сглаживание колебаний уровня для "ликвидации" ветровой денивеляции.

2.8. Выборка максимальных и минимальных уровней воды осуществляется из ежегодников Госкомгидромета. Сведения об этих уровнях требуются для установления проектных отметок гидротехнических сооружений. Как правило, материалы многолетних наблюдений дают возможность получить экстремумы (максимальные и минимальные измеренные значения уровней), что позволяет полностью удовлетворить запросы практики. Обработка уровней осуществляется так же, как и в случае со средними уровнями, т.е. находят среднемесячные (среднемноголетние) максимумы (минимумы) уровня, среднеквадратические отклонения и математическое ожидание уровней с доверительным интервалом заданной вероятности превышения. При коротком периоде существования водохранилища в качестве экстремальных уровней воды принимаются проектные уровни форсировки и сработки водохранилища.

2.9. Наглядное представление об изменчивости уровня дает кривая обеспеченности. Обычно она строится по срочным наблюдениям за месяц, сезон, год и характеризует продолжительность состояния уровня в году, если построена по данным непрерывного ряда наблюдений за один год или несколько лет.

На водохранилищах, где период наблюдений ограничен ледовыми условиями, характеристикой изменчивости уровня служит кривая обеспеченности за безледный период, рассчитываемая по многолетнему ряду наблюдений. При этом за безледный период принимается промежуток времени от даты окончательного очищения водоема ото льда до даты устойчивого появления льда.

Обеспеченность уровней рассчитывается в процентах по данным срочных наблюдений по формулам:

для среднесуточных уровней

$$P = (m/n)100; \qquad (24)$$

для наивысших уровней

$$P = [m/(n+1)]100. \qquad (25)$$

Обеспеченность наивысших годовых и среднегодовых уровней определяется по формуле

$$P = [(m-0,3)/(n+0,4)]100, \qquad (26)$$

где m – номер члена ряда, расположенного в порядке убывания членов;
n – общее число членов ряда.

Кривая обеспеченности строится в координатных осях на клетчатке вероятности, причем по оси абсцисс откладывается процент обеспеченности, по оси ординат – значения уровня (его интервалы). Проценты обеспеченности относятся к нижним границам интервалов уровней.

На кривую обеспеченности желательно наносить высотное положение среднего, максимального и минимального уровней и даты их строения.

2.10. Эмпирические кривые обеспеченности экстремумов наносятся на клетчатку вероятностей.

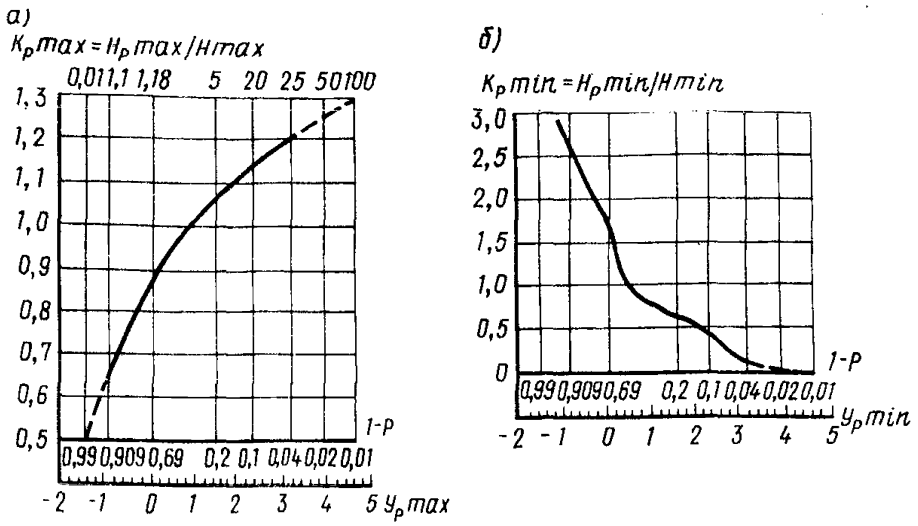


Рис. 2. Безразмерные кривые обеспеченности экстремальных отклонений уровня
а – наивысших; б – наинизших

Все расчеты выполняются в табличной форме, а эмпирические кривые распределения экстремумов наносятся на график (рис. 2).

Оценка параметров распределения экстремумов осуществляется по выражениям:

$$1/\alpha = \sigma_{H_{max,min}} / \sigma_n ; \tag{27}$$

$$U_{max,min} = \bar{H}_{max,min} - \bar{Y}, \tag{28}$$

причем при оценке минимумов знак в выражении (28) меняется на противоположный. Здесь

$$\sigma_{H_{max,min}} = \sqrt{(1/n)\sum_{m=1}^{n} H^2_{max,min} - \bar{H}^2_{max,min}}, \tag{29}$$

где n – длина исследуемого ряда; m – порядковые номера членов ряда ($m = 1, 2, \ldots, n$); $H_{max,min}$ – члены ряда экстремумов (их значения), расположенные в убывающем порядке; $\bar{H}_{max,min}$ – средние значения исследуемого ряда;

$$\bar{H}_{max,min} = (1/n)\sum_{m=1}^{n} H_{max,min}; \tag{30}$$

$\bar{Y}$ и σ_n – среднее значение и среднеквадратическое отклонение приведенной переменной Y (выбирается по табл. 1.12*).

С учетом всех перечисленных величин экстремумы заданной обеспеченности (вероятности превышения) рассчитываются по формуле

---

* Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях – М.: Гидрометеоиздат, 1973.

$$H_{p_{max,min}} = U_{max,min} + (1/\alpha) y_{p_{max,min}}, \qquad (31)$$

где $y_{p_{max,min}}$ снимается с соответствующих графиков *а* и *б* рис. 2 .

2.11. Определение связи между двумя пунктами необходимо для взаимного контроля наблюдений и для получения многолетних характеристик колебаний уровня в пункте с коротким рядом наблюдений.

Для решения задачи выбирается в пределах изучаемого водоема пункт-аналог с многолетним надежным рядом наблюдений, близко расположенный к исследуемому и находящийся в сходных гидрометеорологических и геоморфологических условиях.

Суждение о сходстве колебаний уровня воды в обоих пунктах осуществляется по совмещенному хронологическому графику ухода уровней, строящемуся для одинакового периода наблюдений, например за месяц.

Связь между двумя пунктами выражают в виде уравнения регрессии либо графически. При построении графика связи прямая проводится только при явной корреляции точек около одной линии и должна обязательно проходить через точку со средними значениями переменных $(\bar{X}, \bar{Y})$. Аналитическое выражение линейной зависимости может быть получено при помощи метода наименьших квадратов.

2.12. Расчетные уровни необходимы для определения (назначения) высотных отметок гидротехнических сооружений, в основном располагаемых на открытых акваториях. В зависимости от класса сооружений обеспеченность расчетных уровней, получаемых описанными выше приемами, может колебаться в значительных пределах. При проектировании берегоукрепительных сооружений значения обеспеченности следует принимать согласно данным табл. 2.

Таблица 2

Берегоукрепительные сооружения	Обеспеченность расчетных уровней, %		
	класс сооружений		
	II	III	IУ
Подпорные гравитационные стенки	1	25	50
Буны и подводные волноломы	–	–	50
Волнозащитные дамбы	0,1	0,5	1
Искусственные пляжи:			
а) без сооружений	–	–	1
б) с сооружениями	–	–	50

Примечание. Для берегоукрепительных сооружений II и III класса, а также IУ класса (волнозащитные дамбы и искусственные пляжи без сооружений) обеспеченность расчетных уровней необходимо принимать по наивысшим годовым уровням. Для берегоукрепительных сооружений 1У класса (подпорные гравитационные стены, буны и подводные волноломы, искусственные пляжи с сооружениями) обеспеченность расчетных уровней необходимо принимать по средним годовым уровням.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНЕНИЯ

Особенности ветрового волнения на водохранилищах

3.1. Современная теория рассматривает ветровое волнение с позиций представления о спектральной структуре волновых процессов. Взволнованная ветром поверхность водоема имеет очень сложный рельеф, непрерывно меняющийся во времени и пространстве, который представляется как результат сложения элементарных (синусоидальных) волн (или спектральных составляющих) с различными высотами, длинами, периодами, направлениями и скоростями распространения.

3.2. Развитие волн в значительной степени определяется силой, продолжительностью и направлением ветра. Последнее обусловливает длину разгона волн, на протяжении которого ветровой поток воздействует на поверхность водоема. На водохранилищах и озерах величина разгона даже при незначительных изменениях направления часто существенно меняется из-за сложности контура береговой черты, наличия островов и полуостровов.

В последние годы появилось понятие об эквивалентном разгоне волн, который определяется с учетом удельного вклада отдельных его составляющих по разным направлениям (под разными углами от основного направления ветра). Тем самым учитывается сложная береговая конфигурация водоема.

3.3. Простые условия волнообразования характеризуются поперечно однородным ветровым потоком, при котором скорость ветра постоянна или изменяется в пределах 4 м/с, направление отклоняется в пределах 22,5°, а контур береговой черты имеет несложную форму (соотношение лучей разгона самого длинного к самому короткому, проведенных через расчетную точку под углом 45° от направления ветра, составляет менее двух). Во всех остальных случаях условия волнообразования считаются сложными. К таким условиям волнообразования на водохранилищах в основном относятся случаи, когда отмечается сложная форма контура береговой черты при однородном в поперечном направлении поле ветра.

3.4. Помимо указанных факторов развитие волн определяется еще глубинами водоема и их изменением по пути разгона. В зависимости от этого фактора акватории делятся на глубоководные (глубокая вода) и мелководные (мелкая вода). Волны открытого водоема при выходе на мелководье (зона трансформации) существенно изменяются: высота их уменьшается, а период чаще всего остается неизменным. При подходе к берегу (в прибойной зоне) такие волны постепенно обрушиваются, разбиваясь на более мелкие, носящие название прибойных волн (прибоя). Наконец, в приурезовой зоне образуется накат – непрерывный возвратно-поступательный поток.

При огибании различных препятствий (надводных или подводных) сравнительно ровные линии гребней волн искривляются и уменьшаются по высоте (явления рефракции и дифракции волн).

3.5. Рост волн не происходит беспредельно даже в условиях неограниченных разгонов волн и глубины водоема, а ограничивается определенным соотношением скорости ветра (W) и скорости распространения волн (C). По достижении такого соотношения, когда прирост энергии ветра волнами будет равен рассеянию энергии (диссипации), дальнейшее нарастание высоты волн прекращается и затем постепенно начинается их затухание. Этим объясняется некоторое запаздывание наибольшей высоты волн относительно времени достижения максимальной скорости ветра за шторм.

Выделяются три стадии развития волнения.

Нарастающее волнение, наблюдаемое обычно в начале шторма или при быстром изменении направления ветра, характеризуется увеличением во времени высоты волн (в точке наблюдений). В этот период сравнительно большим скоростям ветра соответствуют относительно небольшие высоты волн.

Установившееся (развитое) волнение, наблюдаемое при достижении полного развития волн при данных ветровых условиях, характеризуется

неизменными или маломеняющимися во времени элементами волн и ветровыми условиями (скоростью и направлением ветра).

Затухающее волнение, зыбь (мертвая зыбь), наблюдаемое при ослаблении ветра (полном затухании) или при быстрой смене его направления, характеризуется непрерывным уменьшением высоты волн во времени или по разгону, при этом сравнительно малым скоростям ветра соответствуют относительно высокие волны.

Изменчивость ветра по направлению может приводить также к образованию одновременно двух или нескольких систем волн от разных направлений, когда на волны от предшествующего направления ветра (зыбь) накладываются ветровые волны, развившиеся при новом направлении ветра. При наложении этих систем волн образуется смешанное волнение, высота которого будет складываться из высоты ветровых волн и высоты волн зыби.

Особым случаем смешанного волнения являются стоячие волны (толчея), образуемые при наложении встречных или близких к ним систем волн.

3.6. Ветровые волны на водохранилищах в отличие от морских волн имеют большую зависимость от конфигурации водоема и его глубин в особенности при значительных колебаниях уровня воды в безледное время. По своим размерам они меньше, но обладают большей крутизной. Инерция волнения гораздо меньше, поэтому явлений мертвой зыби почти нет.

Задачи учета волнения при проектировании гидротехнических сооружений и пути их решения

3.7. Изучение волнового режима водохранилища входит в программу гидрометеорологических изысканий для проектирования различных гидротехнических сооружений. Ветровое волнение оказывает в безледный период существенное влияние на гидрологическую обстановку водоема; его необходимо учитывать, например, при изучении течений, водообмена, загрязнения вод. Волны выступают в качестве важнейшего гидродинамического фактора таких процессов, как формирование донных отложений, перемещение наносов вблизи берегов, деформация мелководий и берегов. Знание режима волнения позволяет оценить предельные показатели интенсивности и суммарные характеристики волновых процессов, что представляет наибольший интерес для оценки волнового воздействия на объекты строительства, для обоснования необходимости возведения берегоукрепления и его конструкции.

3.8. Под режимом волнения понимается совокупность волновых характеристик за длительный промежуток времени (обычно не менее 10 лет). Однако возможности использования данных регулярных наблюдений для оценки режима волнения, как правило, бывают весьма ограничены из-за малой освещенности этими наблюдениями всего разнообразия волн по акватории водоема и во времени. Большинство волномерных пунктов относится к узкой прибрежной зоне, где наблюдения производятся лишь 2—3 раза в сутки. В открытом же водоеме полуинструментальные и инструментальные наблюдения ведутся только эпизодически. Все это не дает возможности получить достаточно надежные сведения о режиме волнения на основе характеристик волнения на данном водоеме даже в конкретном его районе.

3.9. Наиболее полные сведения о волновом режиме водоема получают расчетным путем, используя методы и приемы вычисления элементов волн по теоретическим и эмпирическим связям с волнообразующими факторами. При этом натурные данные используют для проверки и корректировки результатов расчета этими методами применительно к условиям данного водоема, так как указанные методы не всегда отвечают требованиям практики.

3.10. Наблюдения не должны преследовать только узкую практическую цель строительства. Получение таких редких и ценных материалов наблюдений на любом водоеме должно быть направлено на более широкое многоцелевое освещение волнового режима. В настоящее время, когда в стране ставится задача наиболее эффективного и рационального проведения любых работ, встает необходимость применения единых общесоюзных методик в

наблюдениях, их обработке и в расчетах волнения. В связи с этим методика изысканий для оценки волнового режима на водохранилищах должна соответствовать единым требованиям и стандартам, которые наиболее разработаны для сети Госкомгидромета. Результаты таких изысканий могут включаться в ежегодно издаваемые материалы Государственного Водного Кадастра.

3.11. Проверка расчетных размеров волн данными натурных наблюдений обязательна для сооружений I и II класса в любых случаях. В особых условиях волнообразования, при которых современные методы расчета элементов волн оказываются недостаточно надежным (не имеют достаточного экспериментального обоснования), проверка бывает необходима для сооружений и более низкого класса.

3.12. Случаи недостаточного обоснования методов расчета элементов волн могут быть связаны со следующими условиями:

1) при относительных разгонах $(D/W^2)10^3 < 0{,}5$

где D – разгон волн, км; W – расчетная скорость ветра, м/с.

Расчетные зависимости построены по теоретическим выводам и нуждаются в уточнении по натурным наблюдениям.

2) при относительных разгонах $H/W^2 < 0{,}001$ в условиях мелководной акватории.

Метод расчета основан на результатах экстраполяции эмпирических данных, полученных для значений $H/W^2 > 0{,}01$.

3) при строительстве сооружения на акватории мелководного водоема со сложным контуром береговой линии, для которого спектральный прием расчета предусматривает недостаточно обоснованное предположение о соответствии углового распределения энергии волн на мелководье (как и на глубокой воде) теоретическому закону:

$$S_{(\alpha)} = (2/\pi)\cos^2\alpha, \qquad (32)$$

где $S_{(\alpha)}$ – дифференциальная функция распределения энергии волн в пределах сектора $\pm 90^\circ$ от направления ветра; $\pm\alpha$ – угол, отсчитываемый от направления ветра при $\alpha = 0^\circ$ в пределах сектора $\pm 90^\circ$.

4) при необходимости построения плана рефракции составляющих углового спектра в условиях сложного рельефа дна (сглаженного в допустимых пределах).

5) при строительстве сооружения в районе, расположенном в условиях прибрежного мелководья с уклонами дна $> 0{,}05$ или $< 0{,}002$.

При уклонах дна $> 0{,}05$, когда при малой протяженности прибрежного мелководья процесс трансформации волн протекает бурно и сопровождается возникновением отраженных волн, расчетные методы не обоснованы экспериментально. При уклонах $< 0{,}002$ в условиях обширной зоны прибрежного мелководья формируется местное волнение по законам волнообразования на мелкой воде. Вместе с тем энергия волн, поступающих из глубоководной зоны на мелководье, может быть погашена силами трения о дно, что методами расчета не учитывается.

Для зоны с уклоном дна 0,002–0,001 рекомендуется использование интерполяционной формулы, допуская, что при уклонах $< 0{,}001$ происходит полное гашение энергии волн из глубоководной зоны вблизи ее внешней границы, а все зоны прибрежного мелководья относятся к мелководной акватории.

6) При наличии в районе строительства сооружения сильных течений ввиду малой изученности их влияния на волнообразование.

При слабых течениях (до 1 м/с) какие-либо особенности в процессе волнообразования не обнаруживаются.

7) При наличии в районе строительства сооружения большого количества водорослей или невырубленной растительности (лес, кустарник), которые могут существенно влиять на волновые процессы.

3.13. Длительность наблюдений за волнением при изысканиях чаще всего не превышает 2–3 лет, так как в такие сроки обычно осуществляются работы по проектированию сооружения.

Для уточнения расчетов почти во всех перечисленных случаях могут оказаться достаточными систематические наблюдения в течение одного-двух безледных сезонов. Задача лишь в том, чтобы получить записи волн при штормах со скоростями ветра, близкими к максимальным (более 10–15 м/с).

Только в случаях трансформации волн и влияния течений требуется организация более длительных наблюдений над волнением (в течение 2–3 лет) с целью получения достаточно-большого статистического материала для обоснования расчетных параметров волн.

Организация волномерных наблюдений

3.14. В период организации волномерных наблюдений осуществляются работы по предварительной оценке условий волнообразования. Они заключаются в анализе имеющихся сведений о ветровом режиме и изучении рельефа дна водоема с целью размещения волномерных установок в наиболее волноопасных районах, выделения мелководной зоны, составления профилей дна по основным направлениям разгона волн в точках их измерения и для определения разгонов по всем волноопасным направлениям.

Геометрический разгон снимается с карты по основному направлению ветра. Если на пути разгона находится небольшой остров или мыс, который волны данного направления могут обогнуть, то разгон определяется без учета этого препятствия. Эквивалентный разгон волн вычисляется по формуле (33), учитывающей удельный вес разгонов по разным направлениям.

Величины разгона волн должны быть определены при отметке нормального подпорного уровня водоема (НПУ), а для мелководных участков – и при уровне мертвого объема (УМО). Последнее необходимо для того, чтобы можно было корректировать величину разгона по уровню водоема, соответствующему периоду волномерных наблюдений, путем простой интерполяции между значениями разгонов при НПУ и УМО.

3.15. Количество волномерных пунктов и точек волномерных наблюдений, их расположение на акватории водоема, включая и прибрежную зону, зависит от размеров и формы водоема, распределения глубин, сложности ветрового режима, класса и размеров проектируемого сооружения.

3.16. В зависимости от местоположения волномерного пункта на водоеме и требуемой точности измерений могут использоваться инструментальный и инструментально-визуальный методы волномерных наблюдений.

При инструментальном методе для изучения волн применяются:

различного рода самописцы волнения (прибрежный струнный волнограф ГМ-61, судовой ГМ-16 и ГМ-62);

аппаратура для наземной и аэрофото- или стереосъемки ветровых волн на большой площади. Изложение аэрометодов приведено в разд. 12, п. 37–42 настоящих Рекомендаций;

приборы или установки, определяющие крайние значения волновых колебаний в одной точке водоема за некоторый отрезок времени (максимально-минимальная веха ГР-24, струнная веха с пружинными индексами).

Инструментальным методом можно определить элементы волн различной обеспеченности в системе, т.е. в течение небольшого отрезка времени.

Инструментально-визуальным является такой метод, при котором измерение волн производится наблюдателем при помощи простейших измерительных устройств (вехи, буя) или волномера-перспектометра. При таких наблюдениях, особенно если измеряются выборочные волны, результаты измерений в какой-то мере зависят от индивидуальных особенностей наблюдателя (не говоря уже об ошибках, которые он может при этом допустить). Этим методом можно определить высоты волн, близкие к 1 %-ной обеспеченности в системе, и периоды волн, близкие к средним.

3.17. Частота и сроки наблюдений определяются степенью изученности режима, особенностями ветрового волнения и поставленными задачами.

По регулярности волномерные наблюдения могут быть систематическими и эпизодическими.

Систематические наблюдения выполняются в постоянных пунктах в течение всего безледного периода ежедневно в установленные сроки. При этом прибрежные наблюдения по волномерным вехам во время небольшого волнения (с высотой волн до 0,5 м) достаточно осуществлять два-три раза в сутки, а в период более сильного волнения необходимо проводить учащенные наблюдения (через 1–3 ч). К систематическим относятся также измерения наибольшей разности волновых горизонтов при помощи максимально-минимальных вех. Они производятся периодически один раз в сутки, а также после каждого шторма (сразу после ослабления или прекращения волнения).

К эпизодическим относятся наблюдения с помощью различных волнографов. Записи волн осуществляются в сроки, предусмотренные программой работ. В каждой серии записываются не менее 100 идущих подряд волн.

3.18. Волномерные наблюдения у берега осуществляются с помощью вех (волномерных и максимально-минимальных), волномера-перспектометра (с вехой или буем) и волнографов. Чаще всего наблюдения проводятся по одиночной вехе или серии вех, установленных на разном удалении от берега по нормали к нему. Волнографы используют для более детальных исследований. Из существующих волнографов предпочтение отдается электроконтактной вехе или системе из трех таких вех – волнографу всех элементов волн ВЭВ-К. Для площадного изучения волнения как с берега, так и с судна может быть применена также стереосъемка.

3.19. Стандартная программа наблюдений за волнением на прибрежных пунктах (по волномерной вехе или волномеру-перспектометру) включает определение следующих элементов:

тип волнения;
направление распространения волн;
средний период волн;
наибольшая разность волновых горизонтов;
скорость и направление ветра;
уровень воды.

Тип волнения устанавливается по наиболее мористому участку, где волнение более характерно для открытого водоема или всего прибрежного района. К основным типам волн относятся ветровые волны и волны зыби.

Трудности в оценке типа волнения возникают, когда существуют и ветровые волны, и зыбь. В этом случае отмечается, какой из типов является преобладающим по высоте волн.

Направление распространения волн оценивается также по наиболее мористой части участка, не искаженной влиянием прибрежного мелководья. Оно определяется по восьми основным румбам с помощью компаса, волномера-перспектометра или по береговым ориентирам. При наличии двух систем волн особо отмечается, какое направление волн преобладает.

Средний период волн определяется по волномерной вехе, бую или береговому прибою. Для этого измеряется промежуток времени, в течение которого через точку наблюдений пройдет один за другим 51 гребень волн. Наблюдения повторяются два раза. Расхождение между двумя отсчетами не должно превышать 5%. В противном случае измерение повторяется еще. Сумма двух отсчетов, деленная на 100, дает величину среднего периода волн (с точностью до 0,1 с).

Наибольшая разность волновых горизонтов измеряется с помощью волномерной вехи или буя. При этом определяется наибольшая высота волны из ста волн, прошедших через точку наблюдений. Измерения высоты гребня и ложбины волн ведутся раздельно. Продолжительность наблюдений назначается в зависимости от среднего периода волн с таким расчетом, чтобы при каждом наблюдении через данную точку прошло 50 волн. Из полученных двух отсчетов гребней берется наибольшее, а из двух отсчетов ложбин – наименьшее значение и по ним получается наибольшая разность волновых горизонтов в метрах.

При волнении высотой менее 0,2 м волномерные наблюдения не производятся.

Наблюдения над ветром осуществляются независимо от наличия в данном районе метеостанции.

Пункты наблюдений размещают в таком месте, чтобы можно было получить наиболее достоверные сведения о ветре над водоемом. К таким местам относятся мысы, незащищенные участки берега.

Измерения скорости ветра чаще всего производятся флюгером или анемометром в те же сроки, что и наблюдения за волнением. В периоды штормов их выполняют ежечасно, при этом обязательно делается запись о начале и окончании шторма. Одновременно определяются и направление ветра по 16 румбам при помощи ориентирного столба с флюгаркой или вымпелом (с точностью до 10–15°). Наибольшую ценность представляют данные непрерывной регистрации характеристик ветра, которые могут быть получены с помощью анеморумбографов (анеморумбометров) различной конструкции. Ветроизмерительные приборы устанавливаются на мачтах, на высоте от 2 до 12 м над земной поверхностью.

Наблюдения над уровнем воды выполняются во все сроки наблюдений за волнами, сразу после производства последних.

3.20. В открытой части водоема для изучения ветрового волнения как правило, достаточно установки одной-двух максимально-минимальных вех (на притопленных буях). Помимо этого могут выполняться наблюдения с помощью заякоренной волномерной вехи и волнографов (ГМ-16, ГМ-62), установленных на плавучих станциях (судах, затопленных конструкциях), а также с использованием аэрофотосъемки. В период таких наблюдений должны вестись измерения ветра на метеостанции, волномерном береговом пункте или судне. Для наблюдений за скоростью ветра на судне используются анемометры, устанавливаемые на высоте 2 м над поверхностью воды. Направление ветра определяется по флюгарке или вымпелу. При организации работ с катера для измерения скорости ветра может применяться судовая дистанционная гидрометеорологическая станция ГМ-6.

Обработка материалов наблюдений

3.21. Обработка материалов ветро-волномерных наблюдений в камеральных условиях включает следующие работы:

1) Обработка данных прибрежных наблюдений за ветром и элементами волн (по вехе или волномеру-перспектометру) и составление табл. 3.

Таблица 3

Дата	Время суток, ч	Ветер		Выполнение				H, м	D, км	Отметка уровня воды, мБС
		α	W, м/с	тип	α	$h1\%$, м	τ, с			
30 VII	03	ССВ	3	э	Ю	0,25	2,5	3,5	5	260,15
	09	С	5	вв	С	0,30	2,9	3,6	7	260,20
	15	СЗ	7	вв	СЗ	0,95	3,0	3,7	15	260,30

2) Обработка наблюдений по максимально-минимальным вехам и составление табл. 4.

Наибольшая скорость ветра, вызвавшая измеренную максимальную высоту волн $h_{макс}$, выбирается из всех наблюдений над ветром (по флюгеру или самописцу) в данном районе (на берегу и на метеостанции), произведенных в интервале времени между граничными отсчетами по максимально-минимальной вехе. Если наблюдению по вехе предшествовали несколько штормов, то берется наибольшая скорость ветра за ниболее сильный шторм и наибольшая высота волн относится ко времени достижения ветром этой скорости.

Таблица 4

Период		$h_{макс}$, м	Ветер			H, м	D, км	Отметка уровня воды, мБС
от	до		α	W,м/с	дата			
3/VII	6/VII	0,55	С	7	5/VII	21,0	3	255,45
6/VII	10/VII	1,65	СВ	12	8/VII	22,2	10	256,60

При этом следует учесть, что на развитие такой волны оказывает влияние не только скорость ветра, но и его направление, определяющее разгон волн, и глубина. Поэтому при подборе ветра следует оценивать все эти факторы.

Уровень воды берется средний за период между отсчетами, по его изменению следует контролировать колебания глубин у вехи.

3) Обработка волнограммы производится в соответствии с методикой ГОИН*. В итоге обработки каждой волнограммы составляется таблица, куда включаются следующие сведения:

дата и время регистрации (до минут);
продолжительность записи (до секунд);
тип датчика и регистратора;
направление и скорость ветра;
глубина воды в месте установки датчика;
расстояние от берега;
тип и направление распространения волн;
число зарегистрированных волн;
максимальная высота волны;
высота и период волн различной обеспеченности в системе.

3.22. После указанной обработки всех волнограмм проводится анализ полученных данных для исключения грубых просчетов и восполнения пропусков. С этой целью могут применяться различные методы: графический, аналитический, сопоставление с расчетом.

Для анализа волнового режима за весь навигационный период строятся совмещенные графики хода элементов волн (h и τ), скорости ветра и уровня воды. Такие графики оформляются по всем волномерным пунктам, при возможности на одном листе (один под другим). На них наносятся условными значками все результаты наблюдений элементов волн (у берега и на акватории).

Кроме того, при необходимости (отсутствие наблюдений, уточнение, проверка измеренной величины) производятся расчеты элементов волн по измеренным характеристикам ветра.

На график также наносятся рассчитанные максимальные высоты волн за шторм. При наличии одновременных наблюдений на глубокой воде и у берега необходимо проверить соответствие фактических максимальных высот волн у берега с расчетными, используя в качестве исходных данные наблюдений на глубокой воде. О наблюдениях, не подтвержденных расчетом, указывается в примечании к таблице.

По наибольшим значениям из всех наблюдений высот и периодов волн проводятся кривые их хода у берега и на акватории (с указанием средней глубины у вехи за период наблюдений в данном году).

3.23. По полученным графикам составляется сводная таблица наблюдений ветра и элементов волн по месяцам и за навигацию в целом. Для ее сос-

---

* Матушевский Г.В. Новый тип режимной функции распределения параметров ветровых волн. — Метеорология и гидрология, 1977, № 3. — с. 66—72.

тавления с графика снимаются наибольшие значения элементов за 8 сроков (через каждые 3 ч): 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 и 24 московского времени.

На основе такой сводной таблицы определяются следующие режимные характеристики ветра и волнения в данном районе водоема по каждому волноопасному направлению ветра:

повторяемости градаций скорости ветра по месяцам и за навигацию;

повторяемости градаций высот волн и периодов волн по месяцам и за навигацию;

осредненные значения высоты и периода волн по градациям скорости ветра при волноопасных его направлениях за навигационный период (для включения в Материалы Государственного Водного Кадастра).

Режимные характеристики позволяют определять: наиболее и наименее волноопасные направления и повторяемость развития для них элементов волн за месяц или сезон; наиболее и наименее штормовые месяцы или сезоны.

Расчетные характеристики волнового режима

3.24. Для проектирования гидротехнических сооружений необходимо прежде всего знать максимальные показатели волн в периоды редких и наиболее жестких штормов. Такие штормы и сопровождающие их ветровые условия называются расчетными и оцениваются режимной обеспеченностью, т.е. возможность их возникновения один раз в заданное число лет (1, 5, 10, 25 или 100 лет).

Кроме того, при гидротехническом строительстве во многих случаях представляет интерес все разнообразие высот и периодов волн, наблюдаемых при различных скоростях и направлениях ветра за многие годы. В наиболее универсальной и компактной форме это разнообразие может быть представлено режимными кривыми распределения высот и периодов, с которых могут быть сняты их значения той или иной обеспеченности (вероятности превышения).

Необходимые для строительства характеристики волнения получают в основном, используя различные приемы расчета.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛН

3.25. До последнего времени для расчета высот ветровых волн на озерах и водохранилищах широко использовался метод А.П.Браславского, приведенный в Технических условиях определения волновых воздействий на морские, речные сооружения и берега (СН 92-60).

Этот метод, разработанный на основе натурных наблюдений и уравнения В.В.Маккавеева о балансе энергии, передаваемой ветром волнам, наиболее правильно отражает закономерности развития ветровых волн на таких водоемах. Однако по данным последних исследований, получаемые этим методом высоты ветровых волн для условий установившегося волнения оказываются существенно заниженными (до 15–20 %). Кроме того, в основу метода заложена значительная схематизация условий волнообразования – неизменность скорости ветра и его направления по акватории всего водоема. Такое допущение может быть правомерным лишь в условиях небольших мелководных водоемов с малой изрезанностью береговой линии.

3.26. Разработанный в последние годы в Государственном океанографическом институте и СоюзморНИИпроекте новый метод расчета элементов ветровых волн дает достаточно высокую точность не только в морских условиях, но и на водохранилищах, он приведен в главе СНиП по нагрузкам и воздействиям на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Этот метод включает практические приемы расчета основных элементов ветровых волн для установившегося и неустановившегося режима с учетом влияния сложного поля ветра и сложной конфигурации береговой линии. Метод основан на анализе точных инструментальных наблюдений волне-

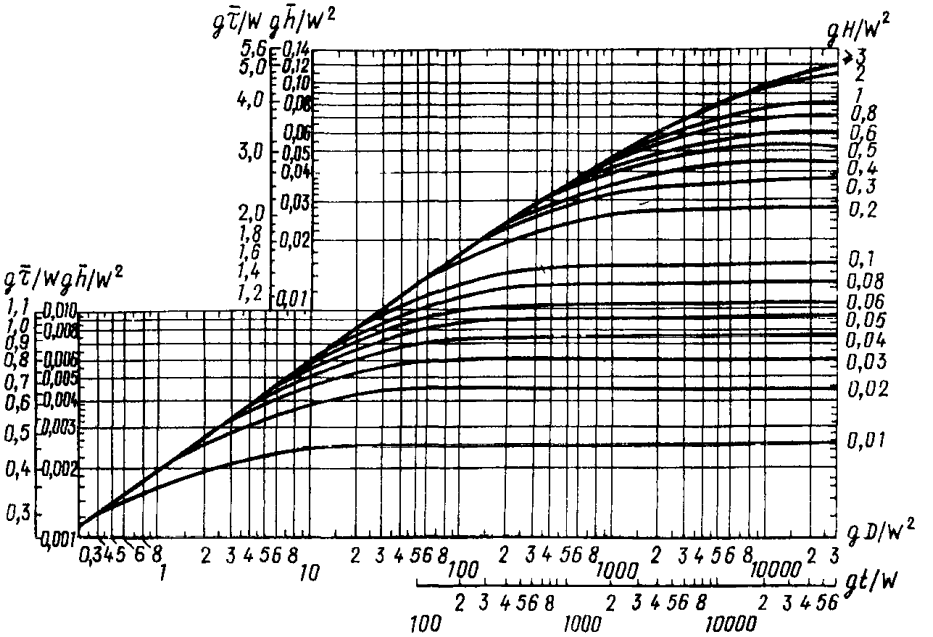


Рис. 3. Графики для определения элементов ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах

ния на различных водоемах (в том числе и водохранилищах) с помощью методов математической статистики и теории размерностей и с использованием современных представлений о спектральной структуре процесса волнения.

На рис. 3 приведены расчетные номограммы метода, позволяющие определить средние высоту и период волн в точке в зависимости от скорости и продолжительности ветра, длин разгона волн и глубины водоема, т.е. практически при любых сочетаниях волнообразующих факторов, не прибегая к схематизации полей ветра или формы береговой линии водоема. Для мелководья они представлены семейством кривых при различных значениях относительной глубины gH/W^2, причем горизонтальные участки кривых соответствуют предельно развитому волнению при данных ветровых условиях.

Преимущество спектрального подхода состоит в том, что он позволяет рассчитывать элементы волн не только на открытых акваториях при различных ветровых условиях, но и в условиях сложной береговой черты водоемов (при наличии мысов, проливов, заливов), к которым прежние методы расчета были неприменимы.

На водохранилищах поле ветра преимущественно бывает однородным, что позволяет проводить расчеты при условии постоянства скорости ветра по длине разгона и учитывать только сложность контура водоема путем введения в расчет эквивалентного разгона волн D_p. Формула для определения D_p отражает процесс передачи энергии ветра водной поверхности в пределах $\pm 45^\circ$ к основному направлению ветра

$$D_p = 0{,}27[D_0 + 0{,}85\,(D_1 + D_{-1}) + 0{,}5\,(D_2 + D_{-2})] \quad , \qquad (33)$$

где D_n, м ($n = 0, \pm 1, \pm 2$) – фактические разгоны по лучам, которые проводятся из расчетной точки до пересечения с линией берега в направлениях $\beta = 22{,}5^\circ$ n от главного луча D_0.

В Руководстве[1] даются также методы расчета трансформации высот волн в прибрежной зоне на основе исходных параметров волнения в открытом водоеме (на глубокой воде). Коэффициенты K_h, приведенные в табл. 5, при $h = 0$ дают возможность однозначного перехода от средних значений высоты волн к их значениям любой другой обеспеченности F_i в системе волн на глубокой воде.

Высота волн обеспеченностью 1% в системе обычно используется для оценки волнения на водоеме. Близкие к ней волны наблюдаются на волномерных пунктах при использовании полуинструментальных методов. В качестве возможного абсолютного максимума при данной ветровой обстановке следует принимать высоту волны обеспеченностью 0,1% в системе.

При выходе волн на мелководье разнообразие высот волн уменьшается и значения коэффициента функции распределения высот волн K_h определяются еще в зависимости от относительной высоты $h = h/H$ (табл. 5).

Таблица 5

F_i, %	$h = \bar{h}/H$				
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20
0,1	3,20	3,09	2,85	2,63	2,48
1,0	2,52	2,48	2,34	2,20	2,10
3,0	2,10	2,03	1,98	1,93	1,87
5,0	1,91	1,90	1,88	1,83	1,77
10,0	1,69	1,68	1,66	1,63	1,59
20,0	1,38	1,38	1,36	1,35	1,34

Продолжение табл. 5

F_i, %	$h = \bar{h}/H$					
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,1	2,36	2,24	2,12	2,01	1,95	1,89
1,0	2,01	1,92	1,83	1,74	1,69	1,62
3,0	1,82	1,76	1,68	1,62	1,57	1,50
5,0	1,72	1,66	1,60	1,54	1,50	1,43
10,0	1,54	1,50	1,45	1,41	1,38	1,35
20,0	1,33	1,30	1,28	1,27	1,25	1,22

РЕЖИМНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЕНИЯ

3.27. Приемы расчета режимно-климатических характеристик волнения основываются на использовании данных о ветре в районах строительства.

Ветер характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, что обусловливает непрерывное изменение элементов волн. На водохранилищах, однако, расчетные скорости ветра определяются в основном

1 Руководство по расчету параметров ветровых волн, – Л.:Гидрометеоиздат, 1969. – 139 с.

без учета их пространственного распределения. Расчетные элементы волн относятся к развитому волнению при продолжительности действия ветра, принимаемой равной 6 ч.

3.28. Обеспеченность расчетной скорости ветра определяется в зависимости от класса сооружения и обеспеченности расчетного уровня воды по табл. 6.

Таблица 6

	Класс сооружения	Обеспеченность расчетного уровня воды, %			
		максимального			
		1 и 5	25	50	75
		минимального			
		100	75	50	25
Обеспеченность максимальной расчетной скорости ветра, %	I, II	20	8	4	2
	III	30	10	5	2
	IV	50	20	10	2

Примечания: 1. При определении отметки гребня сооружений обеспеченность максимального расчетного уровня необходимо принимать для сооружений I класса – 1% и II–IV классов – 5%; 2. Расчетные скорости ветра для сооружений I, II классов надлежит уточнять по данным натурных наблюдений в период стояния расчетных максимальных уровней.

3.29. Максимально возможные скорости ветра и их повторяемости по всем волноопасным направлениям в многолетнем разрезе могут быть получены по данным наблюдений на ближайшей метеостанции в районе водохранилища. До 1953 г. основные метеостанции были оснащены флюгером с легкой доской, фиксирующим скорости только до 20 м/с, и все бо́льшие значения скорости относились к этому пределу. Поэтому результаты наблюдений до этого периода требуют специальной обработки. Позднее стали применяться флюгеры с тяжелой доской, регистрирующие скорости до 40 м/с.

3.30. Для расчетов волнения требуется знать анемометрическую скорость ветра на высоте 10 м над расчетным уровнем воды водоема (с учетом ветрового нагона). Под анемометрической понимается скорость ветра, близкая к средней, которая измеряется анемометром в течение 2–10 мин.

При использовании для расчетов волнения данных наблюдений по флюгеру на различной высоте скорости ветра должны быть приведены к уровню 10 м над водной поверхностью с помощью коэффициента K_z и введена поправка K_Φ для получения анемометрической скорости согласно данным табл. 7.

Таблица 7

z, м	K_z	W, м/с	K_Φ
≤ 5	1,1	≤ 10	1,0
10	1,0	15	0,9
≥ 20	0,7	≥ 25	0,8

Примечание. Для промежуточных значений высоты над уровнем воды z и скорости ветра W значения коэффициентов K_z и K_Φ определяются по интерполяции с точностью до 0,01.

3.31. Для получения расчетных характеристик ветра необходимо располагать многолетними (не менее 5 лет) данными о повторяемости (в процентах) ветра по градациям скорости и направлениям за безледный сезон. В качестве примера такие данные приведены в табл. 8.

Таблица 8

Скорость по флюгеру, м/с	Направление ветра							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0–1	2,0	4,2	8,0	19,3	4,4	1,8	1,2	0,8
2–5	2,3	3,8	10,1	15,5	4,3	2,2	1,1	1,0
6–9	0,6	1,6	2,7	6,4	1,0	0,9	0,6	0,2
10–13	0,1	0,4	1,0	1,5	0,3	1,0	0,1	–
14–17	–	–	0,2	0,3	–	–	–	–
18–20	–	–	0,1	–	–	–	–	–
Σp	5	10	22	43	10	5	3	2

Используя данные табл. 8, можно произвести подсчет повторяемости скорости ветра P и ее обеспеченности F, %, от числа наблюдений каждого направления (табл. 9), при этом флюгерные скорости следует пересчитать на анемометрические с помощью коэффициентов K_φ (табл. 7).

Повторяемость P определяется по формуле

$$P = 100p / \Sigma p, \qquad (34)$$

где p – повторяемость скорости ветра в каждой градации; Σp – сумма повторяемости скорости ветра во всех градациях для данного направления.

Обеспеченность или вероятность превышения F вычисляется суммированием снизу вверх всех значений повторяемости p (по всем градациям скорости).

Таблица 9

Скорость ветра по анемометру, м/с	Направление ветра							
	С		СВ		В		ЮВ	
	p	F	p	F	p	F	p	F
0–1	40,0	100	42,0	100	36,4	100	44,8	100
2–5	46,0	60,0	38,0	58,0	45,7	63,6	36,0	55,2
6–8	12,0	14,0	16,0	20,0	12,3	17,9	15,0	19,2
9–12	2,0	2,0	4,0	4,0	4,3	5,6	3,5	4,2
13–15	–	–	–	–	0,9	1,3	0,7	0,7
16–17	–	–	–	–	0,4	0,4	–	–

Продолжение табл. 9

Скорость ветра по анемометру, м/с	Направление ветра							
	Ю		ЮЗ		З		СЗ	
	p	F	p	F	p	F	p	F
0–1	44,0	100	36,0	100	39,7	100	40,0	100
2–5	43,0	56,0	44,0	64,0	37,0	60,3	50,0	60,0
6–8	10,0	13,0	18,0	20,0	20,0	23,3	10,0	10,0
9–12	3,0	3,0	2,0	2,0	3,3	3,3	—	—
13–15	—	—	—	—	—	—	—	—
16–17	—	—	—	—	—	—	—	—

Затем на билогарифмической клетчатке вероятностей строятся режимные кривые распределения скорости ветра отдельно по каждому волноопасному направлению (по вероятностям превышения F и нижним ступеням градации анемометрической скорости ветра). Проведенные в виде прямых линий (с небольшим разбросом точек), они могут экстраполироваться в область малых обеспеченностей, т.е. в область больших скоростей ветра, не отмеченных наблюдениями. На рис. 4 такая режимная кривая показана лишь для одного направления.

Максимальные размеры волн, возможные при данном направлении ветра один раз в заданное число лет, рассчитываются по наиболее вероятной максимальной скорости ветра, возможной один раз за этот период. Такая скорость ветра соответствует вероятности ее превышения F_n, вычисленной по формуле

$$F_n = 2500/N\Sigma p n , \qquad (35)$$

где N – число дней наблюдений за безледный период; Σp – повторяемость данного направления ветра всех градаций скорости; n – заданное число лет.

По полученному значению F_n с помощью режимной кривой распределения скорости ветра данного направления определяют искомую максимальную скорость ветра. Для примера приведены значения F, полученные с использованием рис. 4 для максимальных скоростей северного ветра ($\Sigma p = 10\%$) и возможные при безледном периоде ($N = 180$ дней) один раз в год и в 100 лет. Так, при $n = 1$ год $W_{макс} \approx 10$ м/с; при $n = 100$ лет $W_{макс} \approx 17{,}5$ м/с.

3.32. При наличии данных наблюдений над ветром более чем за 10 лет определение максимальных скоростей ветра различной обеспеченности в зависимости от класса сооружения (табл. 6) можно осуществлять путем статистической обработки максимальных годовых скоростей ветра волноопасных направлений с построением кривых распределения указанных характеристик ветра и экстраполяцией их в область малых обеспеченностей. С помощью этих кривых определяется расчетная скорость ветра заданной вероятности превышения в режиме.

Для построения таких кривых используют также билогарифмическую клетчатку вероятностей лишь с тем изменением, что вместо значений вероятности превышения вдоль вертикальной оси откладывают значения повторяемости годовых максимумов скорости (за 100% берется ежегодный максимум, 50% – один раз в 2 года, 2% – один раз в 50 лет и т.д.)

Использование этого приема допустимо тогда, когда проведение кривых и их экстраполяция не вызывают затруднений.

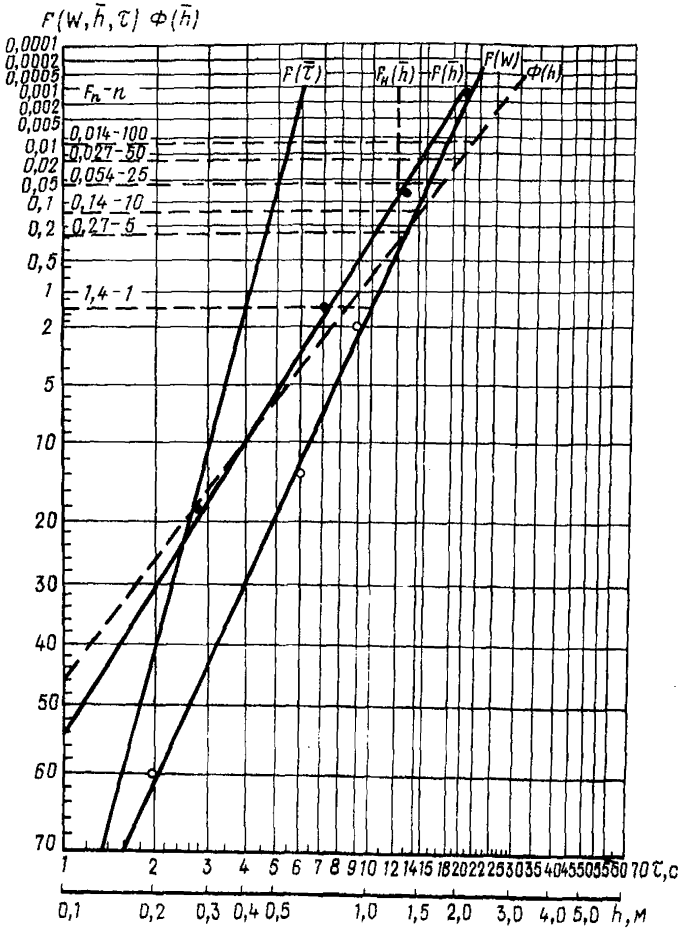


Рис. 4. Функции распределения скорости ветра и элементов волн

3.33. При небольшом периоде наблюдений над ветром (менее 5 лет) или их отсутствии расчетные характеристики ветра следует определять по наиболее жесткому шторму, отмечавшемуся в районе строительства. Наибольшие размеры волн рассчитываются для такого шторма по максимальной скорости ветра без учета времени его действия и изменения по разгону. Вероятность возникновения такой скорости ветра может быть также определена с кривой распределения, построенной по данным наблюдений ежегодных максимумов, или по формуле (46).

3.34. На основе кривых распределения скоростей ветра производится расчет режимно-климатических характеристик волнения с построением для всех волноопасных направлений аналогичных кривых распределения элементов волн в условиях глубокой воды.

С этой целью для скоростей ветра 5, 10, 15, 20 и 25 м/с (предельная граница соответствует максимальной скорости ветра на рис. 4) элементы волн на глубокой воде рассчитываются (на подходе к прибрежной зоне) одним из методов, описанным выше. При этом предполагается, что при всех скоростях ветра данного направления разгоны волн в условиях водохранилища сохраняются одинаковыми.

Вычисленные элементы волн наносят на билогарифмическую клетчатку вероятностей (рис. 4), считая при этом, что обеспеченность волнения будет такой же, что и у исходных для расчета скоростей ветра. Масштаб шкалы абсцисс для высот (в метрах) на графике должен быть уменьшен в 10 раз.

По полученным точкам строятся функции распределения средних значений высот $F(\bar{h})$ и периода $F(\bar{\tau})$ волн для глубокой воды, которые обычно представляются в виде прямых. Точки могут иметь некоторый разброс около прямых линий. Отклонение влево в области больших обеспеченностей (примерно больше 40%) и вправо в области малых обеспеченностей считается фиктивным. Точки отклоняются влево в области больших обеспеченностей из-за неправильного учета случаев малых скоростей ветра. Вправо в области малых обеспеченностей отклонения возможны при коротком периоде наблюдений, что обусловливает завышение повторяемостей (и обеспеченностей) наиболее сильных ветров, близких к возможным максимумам. Поэтому прямые следует проводить по точкам, располагаемым в области обеспеченностей $F \approx 1-50\%$, а затем экстраполировать их в область больших значений элементов волн.

Такие функции строятся для всех волноопасных направлений ветра и представляют собой обычно режимные функции распределения элементов волн за длительный промежуток времени для всего навигационного периода либо для сезона.

3.35. В условиях трансформации волн, приходящих в расчетную точку со стороны глубокой воды, такие функции для высот волн должны пересчитываться с учетом глубин и уклонов дна.

Расчет ведется методом последовательных приближений. Нет необходимости задаваться малыми пробными значениями высоты, так как ясно, что они при глубине больше критической ($H > H_{кр}$) не будут меняться. Следует проверить высоты вблизи значения критической высоты $\bar{h}_{кр} = H/2$, начиная с несколько меньших значений.

Для примера, приведенного на рис. 4, пересчитаем функцию распределения высот волн $F(\bar{h})$ на глубину $H = 3$ м при уклоне дна $S = 0{,}02$ и $\bar{h}_{кр} = 1{,}5$ м.

Первое пробное приближение: при средней высоте $\bar{h}_0 = 1{,}2$ м для той же обеспеченности снимаем с функции $F(\bar{\tau})$ значение среднего периода $\bar{\tau}_0 = 4{,}9$ с и определяем среднюю длину $\bar{\lambda}_0 = 1{,}56 \times 5{,}0^2 = 37$ м. Вычисляем для этой высоты критическую глубину. Для высоты 1 %-ной обеспеченности $h_{1\%} = 2{,}52 \cdot 1{,}2 = 3{,}0$ м по рис. 5 определяем, что при $h_{1\%}/\bar{\tau}^2 = 0{,}125$ относительная глубина $H'_{кр}/\bar{\lambda}_0 = 0{,}105$, откуда $H'_{кр} = 3{,}9$ м. Из табл. 10 на этой относительной глубине коэффициент "потерь" $K_п = 0{,}87$ и, значит, $K_{1\%} \cdot K_п = 2{,}52 \cdot 0{,}87 = 2{,}20$.

Таблица 10

Относительная глубина $H/\bar{\lambda}$	Значения коэффициента "потерь" $K_п$ при уклонах дна S, равных	
	0,025	0,02–0,002
0,01	0,82	0,66
0,02	0,85	0,72
0,03	0,87	0,76
0,04	0,89	0,78

Продолжение табл. 10

Относительная глубина	Значения коэффициента "потерь" $K_п$ при уклонах дна S, равных	
	0,025	0,02–0,002
0,06	0,90	0,81
0,08	0,92	0,84
0,1	0,93	0,86
0,2	0,96	0,92
0,3	0,98	0,95
0,4	0,99	0,98
0,5 и более	1,00	1,00

Примечание. При уклонах дна $S \geq 0{,}03$ принимается $K_п = 1{,}00$.

Второе пробное приближение: при тех же исходных средних элементах волн определяем, что $\bar{h}_{1\%} = 2{,}20 \cdot 1{,}2 = 2{,}6$ м; $h_{1\%}/\bar{\tau}^2 = 0{,}108$; $H''_{кр}/\bar{\lambda}_0 = 0{,}090$ и, следовательно, $H''_{кр} = 3{,}30$ м.

Второе приближение принимается за окончательное, так как при исходной $\bar{h}_0 = 1{,}2$ м на глубокой воде точка $H = 3$ м лежит в прибойной зоне. Отсюда на рис. 5 $H/\bar{\lambda}_0 = 0{,}081$; $h_{пр1\%}/\bar{\tau}^2 = 0{,}10$; $h_{пр1\%} = 2{,}4$ м. На относительной глубине, равной 0,10, $K_п = 0{,}86$ и $\bar{h}_{пр} = h_{пр1\%}/K_{1\%}K_п = 2{,}4/0{,}86 \cdot 2{,}52 = 1{,}2$ м.

При больших значениях $\bar{h}_0$ точка с $H = 3$ м также располагается в третьей зоне (прибойной), поэтому дальнейшие расчеты ведутся по рис. 5.

При $\bar{h}_0 = 1{,}4$ м, $\bar{\tau}_0 = 5{,}2$ с и $\bar{\lambda}_0 = 42$ м получаем: $H/\bar{\lambda}_0 = 3/42 = 0{,}072$; $h_{пр1\%}/\bar{\tau}^2 = 0{,}087$; $h_{пр1\%} = 2{,}4$ м; $K_п = 0{,}83$; $\bar{h}_{пр} = 2{,}4/0{,}84 \cdot 2{,}52 = 1{,}2$ м.

При $\bar{h}_0 = 1{,}5$ м, $\bar{\tau}_0 = 5{,}5$ с и $\bar{\lambda}_0 = 47$ м получаем: $H/\bar{\lambda} = 3/47 = 0{,}064$; $h_{пр1\%}/\bar{\tau}^2 = 0{,}079$; $h_{пр1\%} = 2{,}5$ м; $K_п = 0{,}82$; $\bar{h}_{пр} = 2{,}5/0{,}82 \cdot 2{,}52 = 1{,}2$ м.

По полученным точкам на рис. 4 проводят неубывающую кривую $F_H(\bar{h})$, которая и представляет собой графическое изображение обычной режимной функции распределения высот волн в прибрежной зоне с глубиной 3 м.

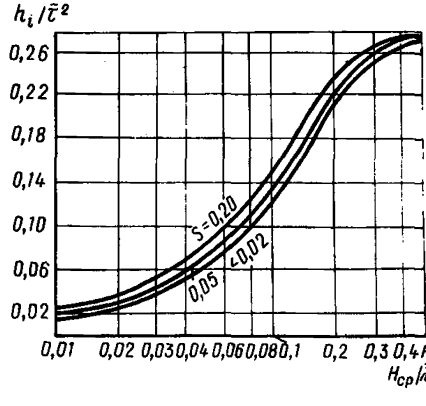


Рис. 5. График для определения высот волн и критической глубины в прибойной зоне

3.36. Г.В. Матушевским предложен метод получения новой режимной функции распределения высот волн, существенно уточняющий режимные элементы волн в области малых обеспеченностей. С помощью этого метода на основе обычной режимной функции $F(\bar{h})$ можно перейти к обобщенной функции распределения высот индивидуальных (видимых) волн $\Phi(h)$ в длительной нестационарной выборке (месяц, год, многолетие). Это эквивалентно статистической обработке высот всех волн, последовательно и непрерывно проходящих в течение многих лет через фиксированную точку данной акватории (такие наблюдения, к сожалению, не могут выполняться).

Если функция $F(\bar{h})$ аппроксимируется распределением Вейбулла, т.е. спрямляется на билогарифмической клетчатке вероятностей, то она может быть записана в общем виде:

$$F(\bar{h}) = \exp[-\alpha(\bar{h}/\bar{h}_{0,5})^{\gamma}], \qquad (36)$$

где $\alpha = \ln 2 = 0{,}693$; $h_{0,5}$ – медианное значение средней высоты волн в режиме.

Параметры $\bar{h}_{0,5}$ и γ снимаются с функции распределения $F(\bar{h})$. Медианная высота $\bar{h}_{0,5}$ отвечает значению вероятности превышения $F = 50\%$. Параметр γ определяется по формуле

$$\gamma = 1{,}47/\ln X_{0,05}, \qquad (37)$$

где $X_{0,05} = \bar{h}_{0,05}/\bar{h}_{0,5}$; $\bar{h}_{0,05}$ и $\bar{h}_{0,5}$ – средняя высота волн, отвечающая вероятности превышения соответственно $F = 5\%$ и $F = 50\%$.

Функция $\Phi(h)$ записывается в виде

$$\Phi(h) = \exp[-\alpha(h/h_{0,5})^{\beta}], \qquad (38)$$

где $h_{0,5} = c\bar{h}_{0,5}$.

Коэффициент c и показатель степени β определяют по табл. 11 по известному значению γ.

Таблица 11

γ	β	c	γ	β	c	γ	β	c	γ	β	c
0,9	0,76	0,76	1,3	0,93	0,77	1,7	1,09	0,79	2,1	1,22	0,80
1,0	0,80	0,76	1,4	0,98	0,78	1,8	1,12	0,79	2,2	1,25	0,81
1,1	0,84	0,76	1,5	1,02	0,78	1,9	1,16	0,80	2,3	1,28	0,81
1,2	0,89	0,76	1,6	1,05	0,78	2,0	1,19	0,80	2,4	1,30	0,82

Средние значения высот волн $\langle\bar{h}\rangle$ и всех индивидуальных (видимых) волн $\langle h\rangle$ вычисляются по формулам:

$$\langle\bar{h}\rangle = [\Gamma(1 + 1/\gamma)/\alpha^{1/\gamma}]\bar{h}_{0,5}; \qquad (39)$$

$$\langle h\rangle = [\Gamma(1 + 1/\beta)/\alpha^{1/\beta}]h_{0,5}, \qquad (40)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Пример. Для обычной режимной функции $F(\bar{h})$ на глубокой воде (рис. 4) найдем обобщенную функцию распределения $\Phi(h)$. Для этого с графика снимаем $h_{05} = 0{,}12$ м и $h_{0,05} = 0{,}52$ м. По формуле (37) находим $\gamma = 1{,}47/\ln 4{,}5 = 1{,}02$.

По данным табл. 11 определяем $\beta = 0{,}81$, $C = 0{,}76$. Следовательно, $h_{0,5} = 0{,}76\,\bar{h}_{0,5} = 0{,}09$. Отсюда получаем:

$$\Phi(h) = \exp[-\alpha(h/0{,}09)^{0{,}81}]\,. \tag{41}$$

Для прибрежной зоны, где функция $F(\bar{h})$ построена для конечной глубины, функция $\Phi_н(h)$ рассчитывается численным способом по формуле

$$\Phi_н(h) = \sum_{i=1}^{N} G(h;\bar{h}_i;h^*)P(\bar{h}_i), \tag{42}$$

где $G(h;\bar{h}_i;h^*)$ – квазистационарная функция распределения высот волн; $P(\bar{h}_i) = F(\bar{h}_i - \Delta\bar{h}/2) - F(\bar{h}_i + \Delta\bar{h}/2)$ – режимная повторяемость средней высоты в малом интервале шириной Δh, определяемая по усеченной функции распределения $F_н(\bar{h})$

$$G(h;\bar{h}_i;h^*) = \exp[-A(h/\bar{h})^{\kappa}], \tag{43}$$

где $A = \pi/4(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}})$; $\kappa = 2/(1-h^*)$; $h^* = \bar{h}/H$.

По полученной функции $\Phi(h)$ существенно уточняются значения максимальных высот волн, возможных один раз в заданное число лет (n).

3.37. Если функция $\Phi(n)$ получена в аналитическом виде распределения Вейбулла, то значение максимальной высоты волн h_m, возможной один раз в n лет, вычисляется по формуле

$$h_m = h_{0,5}(1/\alpha \ln N/0{,}562)^{1/\beta}. \tag{44}$$

где $N = nK\Phi(h_0)/\langle\bar{\tau}\rangle$. Здесь K – число секунд в навигацию; $\langle\bar{\tau}\rangle$ – средний период волн в режиме; h_0 – высота волны, при которой поверхность водоема можно считать штилевой ($h_0 = 0{,}1$ м).

Максимальное значение высоты определяется с 95%-ной доверительной вероятностью. Это означает, что в 95 случаях из 100 максимальные высоты не выйдут за пределы (h_u, h_l), определяющие доверительный интервал.

Доверительные пределы вычисляются по формулам:

$$h_u = h_{0,5}(1/\alpha \ln N/0{,}016)^{1/\beta};\quad h_l = h_{0,5}(1/\alpha \ln N/3{,}96)^{1/\beta}. \tag{45}$$

Если функция $\Phi(h)$ получена численным путем, то искомые величины h_m определяются по графику функции распределения $\Phi(h)$ как квантили, отвечающие вероятностям превышения:

$$\Phi(h_m) = 0{,}562/N; \tag{46}$$

$$\Phi(h_u) = 0{,}016/N; \tag{47}$$

$$\Phi(h_l) = 3{,}96/N. \tag{48}$$

В отличие от расчетов для глубоководной акватории в данном случае можно ограничиваться вычислением одного предельного значения высоты волн h_m, что связано с условиями обрушения волн при данном уклоне дна.

Пример. Определим максимальную высоту волн, возможную один раз за навигацию, для приведенных выше функций $F(\bar{h})$ и $F(\bar{\tau})$. По рис. 4 с функции $F(\bar{\tau})$ снимаем значения $\tau_{0,5} = 1{,}8$ с и $\tau_{0,05} = 3{,}4$ с и определяем

$$\gamma_{\bar{\tau}} = 1{,}47/\ln\frac{3{,}4}{1{,}8} = 2{,}30.$$

Далее находим среднее значение периода волн в режиме:

$$\langle\bar{\tau}\rangle = (1{,}44\,\Gamma / 0{,}193^{0{,}44})1{,}8 = 1{,}9 \text{ с}.$$

По полученной выше функции (41) находим обеспеченность $\Phi(h_0) = 0{,}47$ при $h_0 = 0{,}1$ м. С учетом этого значения при $n = 1$ и $K = 1{,}56 \cdot 10^7$ с (180 суток) определяем число волн

$$N = 9{,}65 \cdot 10^5.$$

Отсюда $h_m = 0{,}09\ (1/0{,}693\ \ln\ 9{,}65 \cdot 10^5 / 0{,}562)^{1{,}24} = 3{,}8$ м с доверительными пределами $h_u = 5{,}0$ м и $h_l = 3{,}2$ м.

3.38. Если наблюдения над элементами волн проводятся не менее 5 лет, то можно осуществить проверку рассчитанных режимных функций распределения. Наибольшую ценность для подобной проверки представляют результаты инструментальных измерений. Практически целесообразно строить режимные функции средней высоты волн или высот обеспеченностью 3–5% в системе. Если наблюдения проводятся в мелководной прибрежной зоне, то усечение полученной функции следует проводить на предельно возможное значение средней высоты волн. Обработка данных измерений выполняется по обычным правилам математической статистики.

3.39. На основе режимных функций распределения элементов волн рассчитываются следующие режимные характеристики волнения и ветра:

1) максимальная скорость ветра (W , м/с), средние элементы волн ($\bar{h}$, м; $\bar{\tau}$ с) и значения индивидуальных высот волн ($h_{F1\%}$, $\hat{h}_F$, м) и их возможные максимумы раз в n лет (табл. 12);

Таблица 12

РАЙОН А. ГЛУБИНА 6 м

		Волноопасные направления ветра						
		С					СВ*	СЗ*
		W	$\bar{h}$	$\bar{\tau}$	h_E	$h_{F1\%}$	—	—
Режимная обеспеченность, %	50	2,6	0,40	3,0	0,30	0,75	—	—
	25	4,5	0,65	3,8	0,55	1,4	—	—
	10	6,5	0,85	4,2	0,85	2,1	—	—
	5	7,5	1,0	4,9	1,1	2,8	—	—
	1	10	1,3	5,5	1,5	3,8	—	—
Значения, возможные один раз в n лет	1	9,5	1,0	5,3	1,4	3,5	—	—
	5	13	1,3	6,0	1,9	4,8	—	—
	10	14	1,4	6,1	2,1	5,3	—	—
	25	15	1,8	6,3	2,3	5,8	—	—
	50	16	2,0	6,5	2,5	6,3	—	—

* Режимные характеристики данных направлений ветра рассчитываются аналогично направлению С.

2) максимальная высота волн в шторме (h_m, м) и доверительные интервалы (h_u и h_l, м) в зависимости от средней высоты волн за шторм ($\bar{h}$, м) (табл. 13).

Таблица 13

$\bar{h}$, м	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75
h_m, м	1,10	1,95	2,75	3,55	4,40	5,20	6,00
h_u, м	1,40	2,30	3,20	4,00	4,90	5,80	7,00
h_l, м	0,90	1,65	2,40	3,20	3,20	4,70	5,50

3.40. При оценке и прогнозе динамики прибрежных наносов и ветроволновой абразии берегов кроме расчетов элементов волн используются суммарные волно энергетические характеристики. Рекомендации по расчету последних помещены в прил. 3, п. 3.2.

4. ИЗУЧЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ

4.1. С течениями связано перемещение и распределение взвешенных и растворенных веществ, а также живых организмов в водохранилищах. Течения влияют на заиление водоемов, разбавление сточных вод, ледообразование. Данные о течениях необходимы при решении вопросов берегозащиты, выбора мест расположения водозаборов и водосбросов, портов и портов-убежищ.

4.2. Все течения могут быть подразделены на течения, развивающиеся в открытой части акватории и в прибрежной зоне.

В первой группе наибольшее значение имеют ветровые и стоковые течения.

Группу прибрежных течений образуют вдольбереговые волноприбойные, формирующиеся при косом подходе волн, вдольбереговые ветровые и разрывные, определяющие отток вод, поступающих в прибрежную зону.

Вдольбереговые волноприбойные течения ввиду высокой турбулентности и больших скоростей, обладают значительной транспортирующей способностью и поэтому играют большую роль в перемещении наносов и в формировании отмелей и берегов. Зона их существования ограничивается со стороны берега урезом воды, а со стороны водоема – внешней линией забурунивания волн. При слабом волнении эта зона охватывает незначительную часть отмели, а при сильном – всю отмель.

Указанные течения редко действуют отдельно. Обычно несколько видов течений образуют поверхностные и глубинные системы. Сочетания различных видов течений и показатели суммарных течений зависят от гидрометеорологических условий.

4.3. Натурные измерения скорости и направления течений производятся в основном гидрометрическими вертушками и поплавками.

С помощью вертушек получают осредненные по времени горизонтальные скорости на различных глубинах. Измерения производятся с неподвижных конструкций – вышек, треног, каркасов, рам, устанавливаемых на дно водоема, или относительно неподвижных приспособлений – буйков и других плавучих средств, поставленных на якоре или нескольких якорях для исключения "рыскания" и дрейфа. В прибрежной зоне для измерения вертушками могут использоваться тросовые устройства, эстакады, пирсы. В зимнее время измерения производятся со льда.

Для изучения течений на водохранилищах применяются вертушки, позволяющие одновременно измерять скорость и направление течения. К ним относятся буквопечатающие вертушки БПВ-2 и БПВ-2р автономного действия, устанавливаемые на специальных буях, треногах и каркасах, а также вертушки типа ВММ, измерения которыми производятся с плавсредств. При инженерных изысканиях наиболее целесообразно использование измерителя течений ГР-42, у которого приемная часть соединяется проводами с регистрирующей частью, располагаемой на судне. При измерениях в прибрежной зоне возможен вынос регистрирующей части на сушу, а вертушка может быть установлена на треноге или каркасе. К дистанционным приборам относятся еще самописцы течений ГМ-27 и ГМ-45.

Для измерения стоковых течений используются речные вертушки. Лучшими техническими характеристиками обладает вертушка ГР-21М (пределы измерения ею скорости течения составляют 0,04–5,0 м/с).

Изучение течений вертушки вблизи берегов производится в отдельных точках (вертикалях), расположенных на створах. Створы на суше обозначаются вехами или другими сигналами, имеющими достаточную видимость с акватории водохранилища. Точки на створах закрепляются заякоренными

поплавками. Створы и точки измерений должны иметь привязку к местной геодезической сети.

Количество створов и точек измерения течений определяется в основном размерами и рельефом изучаемой акватории и участка предполагаемого строительства. Оно должно быть достаточным, чтобы установить взаимосвязь течений в непосредственной близости к участку строительства с общей циркуляцией водных масс в данной гидрометеорологической обстановке в пределах прилегающей к этому участку акватории. Общее количество створов может быть определено при ознакомлении с имеющимися архивными материалами по климатическим и гидрологическим условиям, планами рельефа изучаемого участка и на основании непосредственного обследования района изысканий. В любом случае для получения характеристик течений необходимо иметь не менее трех створов. На выровненных берегах количество створов может быть минимальным, а на сильно расчлененных – измерения должны производиться на мысах и в заливах. Количество вертикалей на створе определяется прежде всего пространственной изменчивостью течений как по направлению, так и по скорости. Общим правилом во всех случаях должно быть сгущение количества вертикалей в пределах прибрежной отмели и ее свала.

На каждой вертикали течения измеряются на нескольких горизонтах. На прибрежной отмели горизонты измерений располагаются через 0,5 м. За пределами отмели они могут назначаться через 1–2 м в слое воды до 10 м от поверхности, а глубже, как правило, более редко. Дополнительные горизонты измерений могут намечаться вблизи слоя температурного скачка.

Измерения течений при изысканиях носят, как правило, кратковременный характер. Они должны приурочиваться к периодам экстремального состояния гидрометеорологических условий, формирующих течения. Стоковые течения следует изучать при высоких и низких уровнях воды, а ветровые – при ветрах, различных по скорости и направлению. Исходя из этого определяется и частота замеров на отдельных створах. Необходимо стремиться к проведению синхронных замеров с помощью нескольких вертушек.

Продолжительность единичного наблюдения определяется типом используемого прибора и скоростями течения. При скорости течения более 0,1 м/с стабилизация прибора происходит в течение 1–2 мин, а при меньших скоростях время стабилизации увеличивается до 5–7 мин. При использовании измерителя течений ГР-42 отсчеты направления по логометру производят через 10–30 с в зависимости от устойчивости положения стрелки. Скорости определяются по количеству поступающих на пульт сигналов. При больших скоростях течений количество отмечаемых сигналов увеличивают. При использовании самописцев типа БПВ продолжительность наблюдений должна быть равной 3–4-кратному срабатыванию регистратора. Время работы вертушки ВММ на одном горизонте должно быть равно 4–5 мин (при скорости течения более 0,1 м/с) и увеличиваться до 15–20 мин (при меньшей скорости).

Изучение течений с помощью поплавков производится в условиях, когда применение вертушек затруднительно (сильное волнение, ледоход, обилие водорослей) или отсутствуют приборы. Этот способ дает возможность измерить даже самые малые скорости и получить картину распределения течений на значительных площадях. Наблюдения сводятся к фиксации положения поплавков через определенные периоды времени. Скорость вычисляется делением пройденного расстояния на время прохождения его поплавком. Местоположение поплавком определяется с помощью створовых линий, размеченных тросов, засечек теодолитами или мензулами. На обширных акваториях возможна фиксация поплавков при радиолокации и аэрофотосъемке (см. разд. 12, пп. 30–36).

Поплавки подразделяются на поверхностные и глубинные. В качестве поверхностных поплавков могут служить деревянные круги или обрезки иной формы, бутылки и другие плавающие предметы. Поплавки должны иметь минимальные размеры выступающей над водой части, благодаря чему достигается наименьшее влияние ветра на скорость и направление перемещения поплавка. Одновременно с этим поплавки должны иметь достаточные размеры и яркую окраску, обеспечивающие хорошую видимость

их на поверхности воды. Подводная часть поплавков должна обладать плохо обтекаемой формой и возможно меньшим весом.

Можно рекомендовать изготовление поплавков в форме крестовины из поставленных на ребро пластин длиной 40–50 см и шириной 15–20 см. Ребра крестовины врезаются в пенопластовую пластинку, обеспечивающую плавучесть поплавка. Выше пластины на лине укрепляется пенопластовый указатель, окрашенный в яркий цвет. Размеры пенопластовой пластины и указателя подбираются таким образом, чтобы пластина находилась в погруженном состоянии, а указатель на поверхности воды. Конструкция может быть использована и как глубинный поплавок за счет изменения длины линя, соединяющего пластину и указатель. В качестве глубинных поплавков могут использоваться также частично заполненные балластом бутыли, соединенные линем с поверхностным поплавком.

По способу измерения поплавки могут быть привязные и свободно плавающие. Конструктивно первые поплавки отличаются только наличием нити или жилки, с помощью которой измеряют пройденное расстояние за определенный период времени. Наличие нити обеспечивает многократное применение поплавка, но производство измерений затрудняется тем, что наблюдатель должен находиться в месте пуска поплавка.

Изучение течений для проектов строительства различных гидротехнических сооружений имеет свои особенности. При сооружении берегозащитных конструкций течения изучаются для выяснения переноса наносов различной крупности. Основное внимание при этом обращается на прибрежные течения и прежде всего на течения, образующиеся в периоды ветрового волнения. При строительстве водозаборов и водосбросов течения исследуются с целью выяснения перемещения водных масс различного состава, возможного привноса загрязненных вод или растекания сбросных водных масс. Для обоснования строительства водозаборных сооружений течения должны быть охарактеризованы по всей площади прилегающей акватории во все сезоны года.

Изучение течений сопровождается обязательной регистрацией гидрометеорологической обстановки в момент измерений, а иногда и за предыдущие 1–2 суток. На участках выпуска сточных вод в состав наблюдений должны включаться дополнительные работы по изучению температуры воды, химического состава и таких свойств водных масс (цвет, прозрачность, электропроводность и пр.), которые могут охарактеризовать перемещение воды.

4.4. Результаты наблюдений помещаются в таблицы, в которых указываются номер вертикали, дата, глубина измерений течения, скорость и направление течения, скорость и направление ветра, температура воды и другие показатели, полученные параллельно с измерениями течения. Точки расположения вертикалей выносятся на карту участка.

Обработка материалов натурных наблюдений заключается в определении осредненных скоростей и направлений течения по точкам многократных измерений, нанесении полученных данных на карту. При этом целесообразно составлять карты по измерениям на различных глубинах и при различных значениях гидрометеорологических факторов (направлениях и скоростях ветра, положениях уровня воды, сезонах года и т.д.).

При вычислении средних значений показателей течения скорости определяют с точностью до 1 см/с, а направления – до 5°. Средние величины могут быть получены как среднеарифметические и среднегеометрические. Направление течения при углах рассеивания до 40° следует определять как среднеарифметическое, а при углах рассеивания от 40 до 80° как среднегеометрическое. Среднеарифметические показатели в этом случае могут служить в качестве ориентировочных. При больших углах рассеивания необходимо вычислять повторяемость отдельных направлений и скоростей течения.

4.5. При невозможности измерения скоростей вдольберегового ветроволнового течения рекомендуется пользоваться таблицей ТГМ-16*.

---

* Руководство по гидрологическим исследованиям в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. – М.: Гидрометеоиздат, 1972. – 396 с.

Существуют различные способы определения средних скоростей течения, функций распределения скоростей и повторяемости направлений течений, эмпирических зависимостей и ветровых коэффициентов для расчета течений в отдельных районах и т.д.

Представляет интерес расчет скоростей вдольбереговых течений, в основу которого положен баланс волновой энергии и течений. Расчет осуществляется по зонам, начиная с относительно глубоководной, затем мелководной и, наконец, зоны, в пределах которой завершается разрушение волн.

5. ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА

5.1. По количественным и качественным значениям своих характеристик ледовый режим водохранилищ можно подразделить на три периода: осеннего ледообразования, ледостава, весеннего разрушения и таяния льда. Ледовые процессы в эти периоды развиваются на водохранилищах в основном так же, как и на естественных водоемах, хотя и обладают некоторыми особенностями, свойственными только водохранилищам. К этим особенностям относятся наличие полыней в нижнем и верхнем бьефах гидроузлов, оседание ледового покрова на берегах и мелководьях при зимней сработке водохранилищ и др.

5.2. Все наблюдения за ледовым режимом можно подразделить на: 1) стационарные наблюдения, выполняемые в отдельных пунктах водоема; 2) экспедиционные наблюдения, проводимые по всей площади или в определенном районе водохранилища. Состав или программа их устанавливаются в соответствии с теми задачами, для которых эти наблюдения организуются.

5.3. Стационарные наблюдения обычно проводятся для получения характеристик ледового режима за определенный, часто длительный, интервал времени. Типовая программа таких наблюдений включает в себя определение следующих характеристик:

1) в период осеннего ледообразования – даты появления льда, вида и формы ледовых образований, количественных значений ледовых образований (ширины заберегов, степени покрытия плавучим льдом видимой акватории водоема), направления и скорости дрейфа льда;

2) при ледоставе – даты установления неподвижного ледового покрова, характера и состояния ледового покрова, характеристики залегания снега на льду, толщины ледового покрова и высоты снега на нем;

3) в период весеннего разрушения и таяния льда – даты появления воды на льду, подвижек льда и полного очищения водоема ото льда, изменения состояния ледового и снежного покровов, направления и скорости дрейфа льда.

При необходимости на отдельных участках водохранилищ по специальной программе проводятся наблюдения за шугой под ледовым покровом: отмечаются наличие, толщина и плотность шуги.

На водохранилищах, где в период замерзания при определенных условиях возможно образование внутриводного льда, способного забить сороудержательные решетки и водоводы гидротехнических сооружений, выполняется комплекс гидрометеорологических наблюдений по специальной программе.

Этот комплекс включает в себя: учащенные наблюдения за температурой воды по всей глубине с целью определения переохлаждения водной массы; наблюдения за образованием внутриводного и донного льда; наблюдения за температурой воздуха, скоростью и направлением ветра.

Получаемые данные необходимы для обоснования мер по предупреждению ледовых затруднений на гидротехнических сооружениях.

5.4. Стационарные наблюдения по типовой программе (кроме измерений толщины льда и высоты снега) производятся обычно один раз в сутки в утренние часы. Однако при интенсивном развитии ледовых процессов количество сроков наблюдений в течение суток может быть увеличено.

5.5. Сроки измерения толщины ледового покрова устанавливаются в соответствии с необходимой частотой получения информации, а в общем ви-

де должны определяться в зависимости от интенсивности нарастания льда. Так, для водохранилищ средней полосы европейской территории СССР показатель интенсивности нарастания льда (абсолютное увеличение толщины льда в сантиметрах на $-1^{\circ}C$) изменяется по мере увеличения суммы отрицательных значений среднесуточной температуры воздуха $-\Sigma t^{\circ}$ (табл. 14).

Из табл. 14 видно, что в период, когда сумма отрицательных температур изменяется, допустим от 200 до 400°, средняя интенсивность нарастания толщины льда составляет 0,13 см/°С. Следовательно, для увеличения толщины льда на 1 см необходимо, чтобы сумма отрицательных возросла на 8°. По среднемноголетним данным увеличение этой суммы от 200 до 400° происходит за 30 сут. Отсюда можно полагать, что в этот период толщина льда увеличивается на 1 см каждые сутки. С практической точки зрения при толщине льда более 30 см вполне достаточны сведения об увеличении ее на 5 см, т.е. в период возрастания суммы отрицательных температур от 200 до 400° толщину льда следует измерять через каждые пять суток.

Таблица 14

$-\Sigma t^{\circ}$	От 100 до 200	От 200 до 400	От 400 до 600	От 600 до 800	От 800 до 100
Показатель интенсивности нарастания льда, см/°С	От 0,20 до 0,15	От 0,15 до 0,11	с 0,11 до 0,09	От 0,09 до 0,07	От 0,07 до 0,06

Рассуждая аналогично, можно сделать вывод, что при изменении суммы отрицательных температур от 400 до 600° наблюдения следует проводить через 8 сут, от 600 до 800° – через 10 сут, более 800° – через 15 сут. При толщине льда менее 30 см большинству организаций, связанных с эксплуатацией водохранилищ, требуются данные ежедневных измерений толщины льда.

Подобным способом можно установить необходимые сроки измерения толщины льда для водохранилищ различных климатических зон СССР.

Для получения же сравнимых по времени результатов рекомендуются следующие сроки измерения толщины льда в соответствии с ее абсолютными значениями (табл. 15).

Таблица 15

Толщина льда, см	< 30	От 31 до 50	От 51 до 65	> 65
Срок измерений	Ежедневно	Один раз в 5 дней	Один раз в 10 дней	Один раз в 15 дней

При изменении толщины обычно определяются строение ледового покрова и видимая структура льда.

5.6. Методика проведения перечисленных выше наблюдений, определения вида ледовых образований и терминология, используемая при визуальных наблюдениях, изложены в действующем в системе Госкомгидромета Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам.

5.7. Весьма важно определение репрезентативности пунктов стационарных наблюдений за ледовыми явлениями. Целесообразно при этом воспользоваться количественной характеристикой репрезентативности, выраженной в процентах. Эта характеристика показывает, какая часть наблюдений из общего выполненного их числа позволяет получить значения наблюдаемых ледовых явлений, типичные для всей прилегающей к посту акватории водохра-

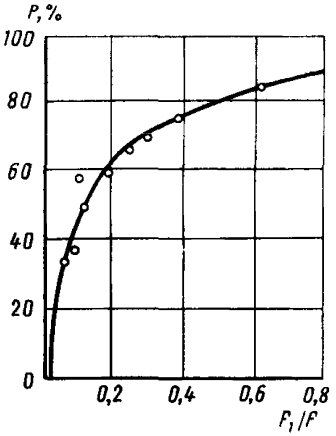


Рис. 6. Зависимость репрезентативности пунктов наблюдений за ледовыми явлениями P, % от величины F_1/F

нилища. Практически репрезентативность можно оценивать следующими показателями: 1) отношением F_1/F, где F_1 – площадь водохранилища, обозреваемая с пункта наблюдений; F – площадь водохранилища, на которую распространяются данные наблюдений с берегового пункта; 2) коэффициентом вариации значений наблюдаемого элемента по площади C_v. Она зависит также от фазы развития ледовых явлений.

Наиболее очевидный способ повышения репрезентативности наблюдений за ледовыми явлениями на водохранилище – увеличение значения F_1. Это достигается увеличением высоты пунктов наблюдений или же числа этих пунктов. Первый путь предпочтителен, так как значительно дешевле.

В табл. 16 приведены размеры дальности видимого горизонта в зависимости от высоты места наблюдения (+1,5 м)*.

Таблица 16

Высота места наблюдений, м	1	2	3	4	6	10	15	20	30
Дальность видимого горизонта, км	2,1	5,4	6,7	7,6	9,4	12,2	15,0	17,2	21,1

При пользовании этой таблицей следует помнить, что в реальных условиях из-за влияния перспективы наблюдатель не в состоянии определить как вид и форму льда, так и его количество на той части акватории водохранилища, которая расположена на расстоянии, превышающем примерно одну треть дальности видимого горизонта. Следовательно, более или менее качественные наблюдения с берегового пункта даже при значительной его высоте (около 40 м) могут быть получены только для такой акватории водохранилища, внешняя граница которой расположена от пункта наблюдений не далее, чем на 7–8 км.

На основе данных, полученных по ряду водохранилищ, определена зависимость репрезентативности пунктов наблюдений за ледовыми явле-

* Высота глаз наблюдателя над местом наблюдений.

ниями, выраженной в процентах, от величины F_1/F (рис. 6). Эта зависимость может быть использована для оценки репрезентативности наблюдений за ледовыми явлениями на любых водохранилищах, так как влияние местных условий на эту зависимость незначительно, а методика и, следовательно, ошибки наблюдений для всех водохранилищ одинаковы.

5.8. Установить репрезентативность измерений толщины льда – это значит определить площадь водохранилища, для которой можно принимать в качестве характерных измерения в каком-либо одном пункте. Наиболее просто эта задача решается сравнением толщины льда в одной точке района водохранилища со средневзвешенной по этому району. В свою очередь средневзвешенная величина может быть получена на основании ледомерных съемок, проведенных по всей площади района методом равноудаленных точек.

Измерение толщины льда в одной точке будет абсолютно репрезентативным в том случае, если полученное при этом значение толщины льда будет равно средней толщине льда в данном районе водохранилища. В реальных условиях вероятность такой репрезентативности близка нулю, так как коэффициент вариации толщины ледового покрова даже на сравнительно небольшом по площади участке водохранилища может быть достаточно велик.

Исходя из точности измерения толщины льда в полевых условиях можно полагать, что если ошибка определения средней толщины льда в исследуемом районе водохранилища по данным измерений в одной точке составит ∓ 10%, то репрезентативность таких наблюдений будет вполне точной.

Ошибка исчисления толщины льда вычисляется по формуле

$$P_h = 100 C_v / \sqrt{n}, \qquad (49)$$

где P_h – ошибка определения средней толщины льда, %; C_v – коэффициент вариации; n – число точек измерений.

Из формулы (49) видно, что при $n = 1$ измерения толщины льда будут характерными для выбранного района лишь в том случае, если соблюдается равенство $P_h = 100 C_v$.

Таким образом, измерения толщины льда в данном пункте будут характерными (репрезентативными) для определенного по площади участка водохранилища в том случае, если разность значений толщины льда в любой точке участка и в пункте измерений не превысит величины заданной ошибки.

Если измерения в одной точке не обеспечивают необходимую точность определения среднего значения толщины льда, то по известным значениям коэффициента вариации C_v и задаваемой точности определения толщины льда P_h (49) определяется необходимое количество точек измерения, которое удовлетворит задаваемой точности.

5.9. Для разработки проектов строительства тех или иных объектов наибольшую влажность имеют экспедиционные работы, которые позволяют получить необходимые сведения о распределении по времени и по площади характеристик ледового режима.

К экспедиционным относятся следующие виды работ: наблюдения за ледовыми явлениями по всему водохранилищу или отдельным крупным районам (авиационные и маршрутные исследования), ледомерные съемки, наблюдения за деформациями ледового покрова, наблюдения за полыньями в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов, определение физико-механических свойств льда, изучение термических и радиационных характеристик ледового покрова.

Методика выполнения большинства этих работ подробно изложена в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам.

5.10. При изучении ледовых явлений на водохранилищах особенно рекомендуется применять авиационные разведки. Они позволяют быстро получить общую и достаточно детальную картину развития ледовых процессов на всей акватории водоема.

Ледовые авиационные разведки – особый вид наблюдений, требующий от наблюдателя как специальной профессиональной подготовки, так и определенных навыков работы в воздухе, оперативности в принятии правильного решения.

Одним из важнейших условий, обеспечивающих успешное проведение ледовой авиаразведки, – хорошее взаимодействие бортнаблюдателя с экипажем самолета. Экипаж должен хорошо понимать поставленную задачу и обеспечить такой режим полета, чтобы создать наиболее благоприятные условия для наблюдений.

Свои наблюдения бортнаблюдатель фиксирует в бортовых журналах ледовой обстановки, где отмечается время (с точностью до минуты), место или район наблюдений, количество льда, его виды и формы, наличие или отсутствие снега на льду, его внешние признаки и т.д. Кроме того, ледовая обстановка в условных обозначениях наносится на карту-схему, которая одновременно служит наблюдателю и для ориентировки в полете.

По данным аэроразведок составляются технические отчеты, где помещаются выписки из бортовых журналов, карты-схемы ледовой обстановки, хронологические графики хода гидрометеорологических элементов, картограммы и выписки из журналов наблюдений за ледовыми явлениями на стационарных пунктах.

5.11. Ледомерные съемки на водохранилищах долинного типа в верховых их частях представляют собой измерения толщины льда на отдельных профилях. Чтобы получить сведения о распределении толщины льда в пространстве для озеровидных частей водохранилища и построить соответствующую карту, целесообразно использовать метод равноудаленных точек, позволяющий произвести оценку точности полученных результатов по формулам теории ошибок. Одно из основных достоинств этого метода – он автоматически учитывает все особенности распределения толщины льда по акватории водохранилища, что не может быть получено при выполнении съемок по профилям. Это объясняется тем, что при выборе профиля (маршрута) не исключена вероятность субъективности, а кроме того, профиль, характерный для данного года при определенных гидрометеорологических условиях, может быть совершенно не характерным в следующем году с другими гидрометеорологическими условиями.

Количество точек измерения и их распределение на исследуемой площади водохранилища всегда можно рассчитать заранее по формуле (49) исходя из заданной точности искомого результата p_h, а также коэффициента вариации C_v толщины льда по площади (обычно при планировании съемок берут наибольшее значение C_v). При этом точки измерения должны быть размещены по площади равномерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Это расстояние определяется по формуле

$$\Delta l = \frac{(l+z) \pm \sqrt{(l+z)^2 + 4(n-1)lz}}{2(n-1)}, \qquad (50)$$

где l и z – соответственно длина и ширина изучаемого района водохранилища.

Допустим, что требуется произвести ледомерную съемку на площади F=4500 км^2 с точностью p_h=5% в условиях такого распределения толщины ледового покрова, когда $C_v \leq 0{,}30$. Принимаем приближенно $l = z = \sqrt{F} =$ = 67,5 км, тогда по формулам (49) и (50) находим n=36 и Δl=13,5 км. Интервал Δl=13,5 км практически мало удобен для работы, поэтому его целесообразно округлить в сторону увеличения (до 15 км) или уменьшения (до 10 км). В первом случае число промерных точек уменьшится, но погрешность результата будет больше заданной, а во втором случае число точек будет больше 36, но погрешность результата уменьшится. Целесообразность выбора того или иного варианта определяется необходимой степенью достоверности получаемых данных и экономическими соображениями.

6. ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩ

6.1. Комплекс работ по изучению температурного режима водохранилищ включает в себя наблюдения в прибрежной зоне; наблюдения в точках, расположенных на некотором удалении от берега (наблюдения "на рейдовых вертикалях"); проведение температурных (гидрологических) разрезов и съемок.

6.2. Наблюдения в прибрежной зоне наиболее просты в исполнении, так как проводятся в районе водомерных постов без использования плавсредств, с мостков, причалов и других береговых сооружений. Обычно измерения выполняются ежедневно в 7 и 19 ч, что обеспечивает возможность определения среднесуточных значений температуры воды. В отдельных случаях при особых гидродинамических и морфометрических условиях, вызывающих значительные внутрисуточные колебания температуры воды, необходимо вводить дополнительные сроки наблюдений.

При выборе точки измерения необходимо иметь в виду, что глубина в этом месте должна составлять не менее 1 м, так как в противном случае наблюдения будут абсолютно нерепрезентативными. В прибрежной зоне измерения температуры воды производятся, как правило, в поверхностном слое.

6.3. Наблюдения на рейдовых вертикалях в значительно большей степени, чем в прибрежной зоне, отражают температурный режим того района водохранилища, где они производятся. Глубина в точке измерений должна приближаться к ее среднему значению для этого района, а характеристики гидрологического режима (наличие течений, режим волнения, условия водообмена и т.д.) не должны вносить искажения в процесс формирования температуры воды в месте расположения рейдовой вертикали по сравнению с прилегающим к нему районом водохранилища. Обычно рейдовая вертикаль располагается на расстоянии от 0,5 до 3–5 км от берега и поэтому наблюдения за ней требуют наличия плавсредств, обеспечивающих безопасность проведения этих работ.

Наблюдения на рейдовой вертикали производятся один раз в 5–10 дней в полуденные часы и включают в себя измерение температуры воды в поверхностном слое, на половине глубины, у дна (при наличии слоя скачка и на других горизонтах) и, кроме того, наблюдения за комплексом метеорологических (температура и влажность воздуха, скорость и направления ветра, облачность, атмосферные явления, видимость) и гидрологических (глубин в точке измерения, степень развития волнения и высота наибольшей волны, направление и скорость течения, прозрачность и цвет воды) элементов, а также отбор проб воды для гидрохимического анализа.

6.4. Температурные (гидрологические) разрезы и съемки осуществляются на определенной части или всей акватории водохранилища. Между собой они отличаются лишь тем, что разрезы выполняются по определенным заранее направлениям (галсам), обычно располагаемым вдоль и поперек водохранилища, а при съемках наблюдения производятся в точках, расположенных более или менее равномерно по акватории. Данные наблюдения, получаемые при выполнении съемок, имеют гораздо более высокую ценность и по объему получаемой информации, и по возможности использования методов математической статистики для их обработки и оценки точности результатов.

Комплекс наблюдений, производимых в каждой точке (вертикали) разреза или съемки, соответствует комплексу наблюдений на рейдовых вертикалях. В отдельных случаях при необходимости производятся только измерения температуры воды, без наблюдений за другими гидрометеорологическими характеристиками, что, однако, затрудняет последующий анализ результатов этих измерений.

Обычно температурные разрезы и съемки производятся один раз в месяц. Следует стремиться к тому, чтобы выполнить их в наиболее короткий срок при одинаковой синоптической ситуации (по возможности не одним, а двумя-тремя судами в зависимости от размеров водохранилища и при рациональном определении курса их следования), так как в противном случае

могут быть получены несравнимые результаты, особенно в весенний и осенний периоды.

6.5. Для измерения температуры поверхностного слоя воды используют ртутные термометры с ценой деления 0,2°С, заключенные в специальную оправу. Эти термометры имеют точность отсчета 0,1°С. В целом они зарекомендовали себя положительно, хотя в определенных условиях (при значительной разности между температурами воды и воздуха, сильном ветре, задержке в отсчете) могут возникать ошибки в определении температуры воды.

Измерения температуры воды по глубине производятся посредством батометра Молчанова или глубоководных опрокидывающих термометров. Использование глубоководных термометров предпочтительней, так как они обеспечивают более высокое качество и надежность результатов наблюдений. Работа с батометром Молчанова и глубоководными термометрами требует наличия на используемом судне гидрологической лебедки с достаточной длиной троса.

Широко применяются в настоящее время электротермометры различных конструкций, такие, как ГР-41М, имеющий диапазон измерений от −1 до 35°С и точностью отсчета 0,1°С и ГР-51 (для измерения низких значений температуры воды с повышенной точностью) с диапазоном измерений от −0,2 до 1,6°С и с точностью отсчета 0,01°С. В определенных условиях использование электротермометров упрощает производство наблюдений. Однако эксплуатация таких термометров требует проведения их регулярных тарировок, а применение сухих элементов для их питания создает затруднение в производстве наблюдений при отрицательных температурах воздуха. На качество работы электротермометров влияет также качка судна и вибрация его корпуса от работы судовых двигателей.

6.6. Одной из основных задач, решаемых при изучении температурного режима водохранилищ, является получение исходных данных для расчета температуры воды всей акватории и водной массы водохранилища или отдельных его районов в различные интервалы времени. В настоящее время существуют следующие методы расчета температуры воды: аналогов; по эмпирическим зависимостям; по уравнению теплопроводности; теплового баланса.

6.7. Метод аналогов заключается в переносе значений температуры воды, полученных на изучаемом водохранилище, на неизученный водоем, расположенный в той же климатической зоне и имеющий однородные гидрологические морфометрические характеристики. Применение этого метода позволяет получить представление о среднемесячных значениях температуры воды. Метод пригоден главным образом для неглубоких хорошо проветриваемых водохранилищ.

6.8. Определение по эмпирическим зависимостям заключается в построении графической связи или нахождении аналитической зависимости между данными наблюдений на постах ($\tilde{t}_n$) величиной средней температуры открытой части водоема ($\bar{t}_{cp}$), т.е. $\bar{t}_{cp} = f(\tilde{t}_n)$. При этом величина $\tilde{t}_n$ рассчитывается как среднеарифметическое значение по данным наблюдений на выбранном количестве постов или же как средневзвешенное значение для того же количества постов, т.е.

$$\tilde{t}_n = K_1 t_1 + K_2 t_2 + \ldots + K_n t_n, \qquad (51)$$

где $K_1, K_2 \ldots K_n$ – площадные коэффициенты постов; $t_1, t_2 \ldots t_n$ – температура воды, измеренная на постах.

Величину $\bar{t}_{cp}$ целесообразнее всего определять планиметрированием карт-схем распределения температуры воды по акватории водохранилища, построенных по данным каждой из выполненных съемок.

Эмпирические зависимости могут быть найдены также между значениями температуры воды и другими гидрометеорологическими элементами. Чаще всего в качестве такого элемента принимают температуру воздуха. В этом случае зависимость имеет следующий вид:

$$\bar{t}_{cp} = a + b t_{200}, \qquad (52)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые местными условиями; t_{200} – температура воздуха на высоте 2 м.

Подобные зависимости могут быть использованы для расчета следующих среднедекадных и среднемесячных значений температуры воды.

6.9. Расчет по уравнению теплопроводности сводится прежде всего к его упрощению для решения конкретной задачи. Так, например, в основу способа А.И.Перовича, нашедшего широкое применение в практике, положен метод суперпозиции. Сущность метода заключается в разложении решаемой сложной задачи на несколько более простых и последующем алгебраическом суммировании температур, рассчитанных в простых задачах. При этом начальные и граничные условия рассматриваются как источники тепла.

Для использования метода необходимо располагать сведениями о ходе теплообмена водной поверхности и дна, коэффициентах тепло- и температуропроводности воды и коэффициенте теплоотдачи на поверхности воды, которые в решаемых и слагаемых задачах должны быть одинаковыми. Использование метода суперпозиции позволяет рассчитать распределение тепла по времени и глубине водохранилищ, независимо от сложности распределения температур по глубине и при переменном во времени теплообмене с атмосферой и ложем.

6.10. Расчет температуры воды методом теплового баланса основан на том, что температура воды является элементом, который входит в расчетные формулы таких составляющих теплового баланса, как эффективное излучение, потери тепла на испарение и турбулентный теплообмен. Используя измеренные или рассчитанные значения суммарной солнечной радиации, альбедо водной поверхности, абсолютной влажности и температуры воздуха, скорости ветра и облачности над водохранилищем и ряда других элементов, решается уравнение теплового баланса относительно температуры воды.

6.11. В качестве примера можно привести полиэмпирическую методику расчета температуры водной поверхности, разработанную для Рыбинского водохранилища и имеющую в своей основе уравнение теплового баланса.

Решение поставленной задачи было выполнено на основе формулы для расчета величин испарения

$$E = 2{,}58 \cdot 10^{-3}(R - B)\Delta e/(1{,}55\Delta e + \Delta T), \qquad (53)$$

где E – величина испарения с поверхности водоема, г/см^2·сут; R – радиационный баланс, Дж/см^2·сут;

$$B = B_T - B_П - B_C \pm B_Г,$$

где B_T – изменение теплозапасов водоема; $B_П$ – приток тепла, вносимый впадающими реками; B_C – потери тепла за счет стока из водоема; $B_Г$ – теплообмен водной массы с грунтами дна; Δe – разность упругостей водяного пара, мб, при температуре воды (e_o) и воздуха (e_z), т.е. $\Delta e = e_o - e_z$; ΔT – разность температур водной поверхности ($T_п$) и воздуха (T_z), т.е. $\Delta T = T_п - T_z$.

Удобство этой формулы заключается в том, что практически все составляющие ее могут быть измерены, за исключением величины e_o, значение которой определяется температурой воды.

Зависимость значения e_o от температуры поверхности воды $t_п$, построенная по данным психрометрических таблиц, показана на рис. 7.

Кривую на рис. 7 можно выразить аналитически как $e_o = f(t_п)$, но для практического использования это уравнение не совсем удобно (степенная функция). Поэтому кривая на рис. 7 была разбита на 5 относительно прямолинейных участков, соответствующих следующим диапазонам температур: I участок – от 0 до 5,9°, II участок – от 6 до 10,9°, III участок – от 11 до 15,9°, IУ участок – от 16 до 19,9°, У участок – от 20 до 25°. Выше 25°С температура воды на Рыбинском водохранилище практически не наблюдалась.

---

[1] Указание по термическому расчету водохранилищ, ВСН 46-71/Минэнерго СССР. – Л.: Энергия, 1972. – 71 с.

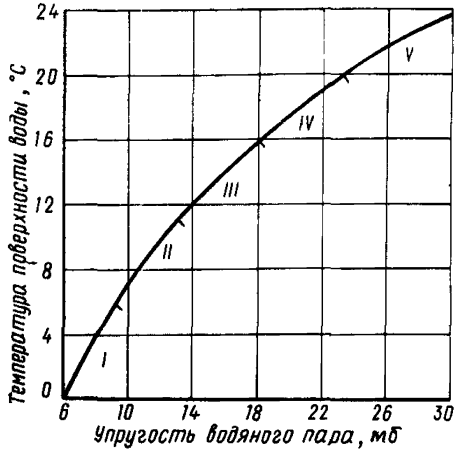


Рис. 7. Зависимость упругости водяного пара e_0 от температуры поверхности воды $t_п$

Для каждого из выделенных участков кривой получены следующие аналитические выражения:

для I участка – $e_0 = 0{,}54\, t_п + 6{,}01$; (54)
" II " – $e_0 = 0{,}75\, t_п + 4{,}81$; (55)
" III " – $e_0 = t_п + 2{,}04$; (56)
" IУ " – $e_0 = 1{,}29\, t_п - 2{,}53$; (57)
" У " – $e_0 = 1{,}64\, t_п - 9{,}54$. (58)

Подставляя полученные выражения для e_0 в уравнение (53) и решая его относительно температуры поверхности воды $t_п$, установлены следующие расчетные уравнения:

для I участка

$$t_п = [(R + B)(6{,}03 - 1{,}1\, e_z) - E\,(10{,}52 - 1{,}7\, e_z - 0{,}83\, T_z)] / [1{,}84\, E - 0{,}54\,(R + B)]; \quad (59)$$

для II участка

$$t_п = [(R + B)(5{,}01 - 1{,}1 e_z) - E\,(8{,}66 - 1{,}7 e_z - 0{,}83\, T_z)] / [2{,}16\, E - 0{,}75\,(R + B)]; \quad (60)$$

для III участка

$$t_п = [(R + B)(2{,}24 - 1{,}1 e_z) - E\,(4{,}36 - 1{,}7\, e_z - 0{,}83 T_z)] / [2{,}55 E - (R + B)]; \quad (61)$$

для IУ участка

$$t_п = [(8{,}92 - 1{,}7\, e_z - 0{,}83\, T_z) - (R + B)\,(2{,}33 + 1{,}1\, e_z)] / [3{,}0\, E - 1{,}29\,(R + B)]; \quad (62)$$

для У участка

$$t_п = [E\,(15{,}99 - 1{,}7\, e_z + 0{,}83\, T_z) - (R + B)\,(9{,}34 - 1{,}1\, e_z)] / [7{,}54\, E - 1{,}64\,(R + B)]. \quad (63)$$

Для расчета $t_п$ на Рыбинском водохранилище рекомендовано использовать следующие данные наблюдений за гидрометеорологическим и радиационным режимами, входящие в расчетные формулы.

Величина R определяется по данным актинометрической станции, производящей наблюдения над водной поверхностью Переборского залива Рыбинского водохранилища.

Величина E (г/см^2 · сут) принимается равной величине испарения по данным наблюдений по испарительному бассейну площадью 20 м^2, установленному также в Переборском заливе.

Величины температуры воздуха T_z (°С) и упругости водяного пара e_z (мб) определяются по данным наблюдений на метеорологической площадке.

Величиной B можно пренебречь по следующим причинам: 1) величина теплообмена водной массы с грунтом в период, когда поверхность водоема свободна ото льда, незначительна; 2) величина притока тепла, поступающего со стоком рек, и потери тепла за счет стока из водохранилища имеют один порядок значений; 3) изменения теплосодержания водохранилища за небольшие интервалы времени относительно невелики.

7. ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ПЛОТНОСТИ ВОДЫ

Основные понятия

7.1. Совокупность растворенных в природных водах минеральных и органических веществ в ионном, комплексном, молекулярном и коллоидном состоянии называется химическим составом воды, который условно принято подразделять на:

а) главные ионы, т.е. количественно преобладающие в природных водах, ионы гидрокарбонатные (HCO_3^-), карбонатные (CO_3^{2-}), сульфатные (SO_4^{2-}), хлоридные (Cl^-), кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}), натрия (Na^+) и калия (K^+);

б) растворенные газы – кислород (O_2), азот (N_2), двуокись углерода (CO_2), сероводород (H_2S) и др.;

в) биогенные вещества – наиболее активно участвующие в жизнедеятельности водных организмов соединения азота, фосфора, кремния, железа и др.;

г) микроэлементы – соединения всех остальных химических элементов;

д) органические вещества;

е) ионы водорода (H^+), находящиеся в природных водах в очень небольшом количестве, но играющие важную роль в химических процессах, протекающих в воде.

Химический состав определяет некоторые практически важные свойства природных вод, такие, как жесткость воды, ее щелочность, окисляемость, агрессивность.

7.2. Сумма всех содержащихся в воде минеральных веществ называется минерализацией воды и выражается в миллиграммах на литр или в граммах на килограмм. При минерализации менее 1 г/кг вода называется пресной, от 1 до 25 г/кг – солоноватой, от 25 до 50 г/кг – соленой. Вода в водохранилищах, как правило, пресная или слегка солоноватая.

7.3. Концентрацию минеральных веществ в воде водохранилищ выражают в следующих формах:

а) весовая форма (мг/л);

б) эквивалентная форма (мг-экв/л); для пересчета из весовой формы в эквивалентную следует концентрацию каждого иона (мг/л) умножить на следующие значения коэффициента K:

HCO_3^-	K=0,01638	Ca^{2+}	K = 0,04990
CO_3^{2-}	K=0,03328	Mg^{2+}	K = 0,08224
SO_4^{2-}	K=0,02082	Na^+	K = 0.04348
Cl^-	K=0,02820	K^+	K = 0,02557

7.4. Величина, характеризующая активность или концентрацию ионов водорода и численно равная отрицательному значению десятичного логарифма активности или концентрации ионов H^+ называется водородным показателем (pH). При pH $= 7$, т.е. при концентрации ионов H^+, равной 10^{-7} г/л, вода имеет нейтральную реакцию, при pH < 7 – кислую, при pH > 7 – щелочную.

7.5. Вода, заполняющая водохранилища, как и другие природные воды, благодаря наличию в ней главных ионов, представляет собой сложную смесь очень разбавленных растворов электролитов и поэтому способна проводить электрический ток.

7.6. Количественной характеристикой электрической проводимости воды служит ее удельная электропроводность – величина, обратная электрическому сопротивлению воды, находящейся между двумя электродами с площадью поверхности 1 $см^2$ и расстоянием между ними 1 см. Единицей удельной электропроводности является сименс на 1 м (1 См/м = 1 1/Ом·м). В практике водных исследований обычно пользуются единицей микросименс на 1 см (1 мкСм/см = $1 \cdot 10^{-6}$ См/см = $1 \cdot 10^{-4}$ См/м).

7.7. Удельная электропроводность воды зависит от концентрации или, точнее, от активности катионов и анионов. На величину удельной электропроводности сильно влияет температура воды, с повышением которой электропроводность увеличивается. Поэтому в качестве косвенного показателя минерализации используются величины удельной электропроводности воды, измеряемые при постоянной температуре, обычно при 18°С. Удельную электропроводность обозначают буквой $\varkappa$ (каппа), указывая принятое значение температуры ($\varkappa_{18°}$). В некоторых руководствах постоянное значение температуры принимается равным 20°С.

7.8. Удельная электропроводность химически чистой воды очень мала ($\varkappa_{18°} = 0{,}088$ мкСм/см), что объясняется частичной диссоциацией ее молекул на ионы H^+ и OH^-. Удельная электропроводность дистиллированной воды равна 2–5 мкСм/см, вод атмосферных осадков и растаявшего льда пресных водоемов – 10–30 мкСм/см, в пресной воде водохранилищ ее значения обычно колеблются от 80–100 до 500–700 мкСм/см, а в зонах загрязнения могут достигать и больших значений.

7.9. Невысокая минерализация и небольшая внутригодовая изменчивость соотношения главных ионов в воде водохранилищ позволяет легко определяемую удельную электропроводность использовать в практике изысканий в качестве экспресс-метода для наблюдения за режимом минерализации воды, для выделения генетически различных водных масс, а также для расчета плотности пресной воды.

7.10. За единицу плотности принято отношение массы дистиллированной воды, равной 1 г, к ее объему при температуре 3,98°С, равному 1 $см^3$. В системе СИ плотность такой воды $\rho = 1000$ кг/$м^3$.

7.11. Плотность воды зависит от температуры, а также от минерализации воды и химического состава растворенных веществ, концентрации взвешенных частиц и давления. Изменение плотности пресных вод из-за влияния перечисленных факторов проявляется в тысячных долях, кг/$м^3$, поэтому для удобства записи при расчетах вводится величина условной плотности $\sigma = (\rho - 1000)\ 10^3$. Таким образом, для вод с пониженной плотностью ($\rho < 1000$ кг/$м^3$) величина σ отрицательна, для вод с повышенной плотностью – положительна.

7.12. При понижении температуры дистиллированной воды от 4 до 0°С ее плотность уменьшается: при 0°С ее плотность $\rho = 999{,}868$ кг/$м^3$ ($\sigma_t = -132$). При повышении температуры такой воды выше 4°С ее плотность также понижается. Вблизи температуры наибольшей плотности уменьшение плотности мало, по мере повышения температуры оно возрастает. Так, при изменении температуры на 1° – от 4 до 5°С – условная плотность изменяется на 8 единиц, при изменении температуры от 29 до 30°С – на 298 единиц.

7.13. С увеличением минерализации плотность воды возрастает, причем плотность вод гидрокарбонатного, сульфатного и хлоридного классов при одинаковой минерализации несколько различна. Плотность природных вод возрастает с увеличением концентрации в них взвешенных частиц, и тем силь-

нее, чем больше средняя плотность этих частиц отличается от плотности воды.

7.14. Вертикальный градиент плотности воды определяет величину устойчивости E водных слоев, препятствующей их перемешиванию:

$$E = (g/\rho)(d\rho/dz),$$

где g – ускорение силы тяжести; z – расстояние по вертикали.

При $E > 0$ плотность воды с глубиной увеличивается, а следовательно, слои воды находятся в состоянии устойчивого равновесия; при $E < 0$ равновесие неустойчивое, вызывающее вертикальное перемешивание воды в водоеме.

Задачи изучения

7.15. Изучение химического состава воды водохранилищ необходимо для оценки агрессивного действия воды на строительные материалы (бетон), стальные и алюминиевые конструкции гидротехнических сооружений. Коррозионные процессы, происходящие в результате воздействия воды на бетон конструкций, подразделяются на три основных вида коррозии:

I – характеризуется выщелачиванием растворимых компонентов бетона;

II – связан с образованием растворимых соединений или продуктов, не обладающих вяжущими свойствами, в результате обменных химических реакций между компонентами цемента и воды;

III вызывается образованием и накоплением в бетоне малорастворимых солей, характеризующихся увеличением объема при переходе в твердую фазу.

Степень агрессивного действия воды на бетон конструкций зависит от показателей агрессивности среды и условий эксплуатации сооружений, что необходимо учитывать при выборе плотности (марки) бетона при проектировании гидротехнических сооружений. В качестве показателя агрессивности воды служат: для коррозии I вида – бикарбонатная щелочность воды (концентрация ионов HCO_3^- в мг-экв/л); для коррозии II вида – водородный показатель pH, содержание свободной углекислоты в мг/л, рассчитываемое по значениям концентрации в воде ионов Ca^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2-} и Cl^-, содержание магнезиальных солей в пересчете на ион Mg^{2+}, мг/л, и содержание едких щелочей в пересчете на ионы $Na^+ + K^+$; для коррозии III вида – содержание сульфатов в пересчете на ионы SO_4^{2-}, мг/л.

Степень агрессивного действия воды на стальные и алюминиевые конструкции, которую следует учитывать при проектировании их защиты от коррозии, зависит от показателя pH и суммарной концентрации ионов SO_4^{2-} и Cl^-.

7.16. Исследования режима минерализации воды и компонентов ее химического состава входят обязательной составной частью в более общую программу исследований качества воды в водохранилищах, используемых как источники промышленного и питьевого водоснабжения, орошения, для водообеспечения тепловых электростанций, а также эксплуатируемых в рыбоводных и рекреационных целях или предназначенных для разбавления промышленных сточных вод.

Наблюдения за режимом минерализации и химического состава воды необходимы при выборе пунктов водозаборов и их конструкции. Особенно важное значение приобретают они в водохранилищах, в которые попадают сточные воды.

7.17. Легко измеряемая удельная электропроводность воды при таких наблюдениях служит исключительно полезной характеристикой, которая дополняет данные о минерализации воды, определяемой трудоемкими методами химического анализа отдельных проб воды. Измерения удельной электропроводности воды позволяют существенно снизить затраты при режимных наблюдениях за минерализацией, увеличив при этом частоту наблюдений в целях повышения точности балансовых расчетов. Использо-

вание погружаемых в водоем датчиков электропроводности способствует достижению сколь угодной детальности зондирования водной толщи при необходимости изучения вертикального распределения минерализации воды, и наблюдений за распространением загрязнений при различных гидрометеорологических ситуациях.

Необходимость в особенно детальных пространственно-временных наблюдениях за электропроводностью воды возникает в долинных водохранилищах с малым водообменом, а также в верховьях водохранилищ каскадов, проточность которых зависит от режима сбросов воды расположенного выше гидроузла.

В долинных водохранилищах сезонного и многолетнего регулирования стока, отличающихся особенно замедленным водообменом и скоростями стоковых течений, величина которых на большей части акватории менее 2 см/с, в периоды летнего и зимнего застоя воды ведущую роль в динамике вод приобретают плотностные течения. При практически одинаковой температуре воды в притоках и поверхностном слое водохранилища в приустьевых участках последнего накапливаются воды с относительно большой плотностью за счет в 2–3 раза и более высокой минерализации речных вод в межень по сравнению с водами половодья, которыми наполняются такие водохранилища. Эти речные воды под действием силы тяжести распространяются из приустьевых в более глубоководные приплотинные районы в виде медленно движущегося (со скоростью около 1 см/с) и сравнительно слабо перемешивающегося с водной массой водохранилища потока в придонном слое или под слоем температурного скачка. Изучение плотных течений в пунктах глубоководных водозаборов важно не только для учета возможной стратификации воды по минерализации, но и для выявления загрязняющих веществ, сбрасываемых в притоки водохранилищ и их приустьевые районы.

В верховьях водохранилищ гидроэнергетических каскадов за счет внутрисуточной и недельной неравномерности сбросов воды из расположенных выше водохранилищ образуются быстро перемещающиеся (со скоростью 40–60 км/ч) длинные волны. Эти волны бывают как прямые, так и обратные. При перемещении длинных волн в водоеме через пункт наблюдений скорость течения сначала возрастает, а затем уменьшается, при прохождении обратной волны направление течения изменяется на противоположное продольному уклону ложа водохранилища. В устьях притоков в зоне проявления длинных волн периодически образуется подпор, в результате которого речные воды накапливаются в приустьевом участке, а на спаде волны втекание речных вод в водохранилище усиливается. В этих условиях при проектировании размещения водозабора особенно большое значение приобретают экспресс-методы исследования режима электропроводности воды как показателя распространения загрязнений, сбрасываемых в водохранилище или его притоки вблизи предполагаемого места водозабора.

7.18. В водохранилищах, подверженных "цветению" воды за счет обильного развития фитопланктона или загрязнению поверхности воды, нередко возникает необходимость проектирования глубинных водозаборов, позволяющих получить воду из слоев с наилучшим качеством. Возможность откачки воды из заданного слоя в стратифицированном по плотности водохранилище определяется в первую очередь соотношением вертикального градиента плотности воды и ее расхода через водозаборное сооружение. Это соотношение может быть определено по формуле

$$F_r = (q/H^2)\sqrt{H/g'}, \qquad (64)$$

где F_r – плотностное число Фруда, выраженное через удельный расход воды q на входе в водозабор, м^2/с; H – глубина водоема у водозабора; g' – эффективное гравитационное ускорение:

$$g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2,$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с^2; ρ_1 – плотность воды у поверхности водоема; ρ_2 – плотность воды в придонном слое. По Деблеру критическое значение плотности числа Фруда $F_r = 0{,}28 \pm 0{,}04$.

При больших его значениях перед водозабором возникает вертикальное перемешивание всей водной толщи. Поэтому для проектирования глубинных водозаборов требуются данные режимных наблюдений за температурой и удельной электропроводностью, позволяющие рассчитывать плотность воды по вертикали в районе предполагаемого сооружения.

Приборы и оборудование

7.19. Основным методом изучения химического состава воды в водохранилищах служит отбор проб воды с последующим их химическим анализом в лаборатории. Для отбора проб воды используются батометры мгновенного наполнения (например, батометр Молчанова ГР-18 емкостью 4 л, снабженный двумя ртутными термометрами), погружаемые на заданный горизонт на тросе лебедки или на капроновом фале, размеченном марками через 1 м. Проба из батометра сливается в стеклянную бутыль или полиэтиленовую канистру, предварительно тщательно вымытые и несколько раз ополоснутые водой из батометра. Для определения в воде главных ионов и ее электропроводности достаточен объем пробы, равный 2 л.

7.20. Поскольку определение pH воды следует производить сразу после отбора пробы в полевых условиях, наиболее широкое распространение получил колориметрический метод определения pH, позволяющий измерить эту характеристику с точностью до 0,1 единицы pH. При наличии походного pH-метра рекомендуется электрометрический метод определения pH. Методика работы с такими приборами освещается в прилагаемых к ним инструкциях. Для колориметрического определения величины pH служит общеизвестная шкала pH для речных вод.

7.21. Хранение в бутылях или канистрах проб воды, предназначенных для определения в них концентрации главных ионов и электропроводности, допускается не более 7 сут, в течение которых необходимо произвести химический анализ воды в лаборатории в соответствии с унифицированными методами определения концентрации ионов HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2+}, Ca^{2+} и Mg^{2+}. Концентрацию в пробе воды ионов Na^+ и K^+ рекомендуется определять на пламенном фотометре ПФМ (или другой марки) в соответствии с прилагаемой к прибору инструкцией. Если пробу воды в бутыли насытить двуокисью углерода, пропуская предварительно CO_2 через дистиллированную воду, анализ главных ионов может быть сделан спустя несколько месяцев после отбора пробы без существенных погрешностей.

7.22. Для измерения электропроводности воды в пробах в лабораторных условиях служит реохордный мост Р-38 с сосудом Х-38, для определения электропроводности воды непосредственно в водохранилище вместо сосуда используют датчики разнообразных конструкций.

7.23. Реохордный мост Р-38 представляет собой уравновешенный одинарный мост со ступенчато регулируемым плечом сравнения и плавно регулируемым отношением плеч. При измерении электропроводности мост питается переменным током 127 или 220 В от сети частотой 50 Гц или от любого генератора тока повышенной частоты до 500 Гц. В полевых условиях питание моста осуществляется от аккумуляторной батареи или сухих элементов через преобразователь с частотой 400–500 Гц. Основная погрешность моста при этом не превышает ± 1,5% в диапазоне 30–30000 Ом. Габариты моста 310×270×160 мм, масса не более 4,5 кг.

Сосуд Х-38 позволяет измерить сопротивление водных растворов электролитов в диапазоне от 30 до 30000 Ом, что соответствует диапазону величин удельной электропроводности воды от 2 до 1000 мкСм/см. Данная электролитическая ячейка представляет собой стеклянный сосуд шарообразной формы с впаянными внутри него двумя платиновыми электродами, покрытыми слоем платиновой черни с целью уменьшения погрешности измерения от поляризации. Размеры сосуда не превышают 150x100x75 мм, а масса его – 100 г. Емкость сосуда 50 $см^3$.

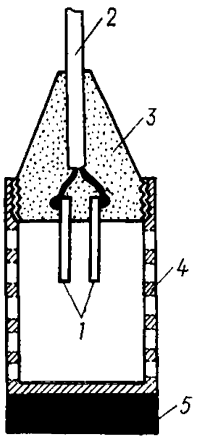


Рис. 8. Датчик кондуктометра
1 – электроды; 2 – кабель; 3 – пластмассовый корпус; 4 – оправа; 5 – груз

7.24. Датчики кондуктометра – прибора для измерения электропроводности воды в водоемах, пока не выпускаемые отечественной промышленностью, могут быть легко изготовлены в электротехнических мастерских. В наиболее простом варианте конструкции такого датчика (рис.8) в качестве электродов служат две пластины нечерненой платины 20х20 мм (каждая толщиной 0,1–0,2 мм), аналогичные тем, что используются в сосуде Х-38, либо такого же размера пластины из хорошо отполированной нержавеющей стали толщиной до 1 мм, к которым привариваются провода двухжильного кабеля сечением 0,5–0,75 мм в резиновой или хлорвиниловой изоляции. Для обеспечения жесткости крепления электродов, которые должны быть взаимно параллельны с зазором между пластинами около 4 мм, и гидроизоляции места сварки и ввода кабеля в датчик небольшую часть электродов (не более 5 мм), оголенный от изоляции участок кабеля и первые 20–30 мм кабеля с ненарушенной изоляцией заливают эпоксидной смолой или формуют из этакрила, протакрила либо других твердеющих изоляционных материалов. Датчик помещается в съемный перфорированный пластмассовый стакан-оправу, предохраняющую электроды от механических повреждений при погружении в водоем до дна или во время транспортировки прибора. Кроме того, он снабжается свинцовым или стальным грузом, вес которого достаточен для натяжения кабеля, используемого для погружения датчика на горизонты измерения. Длина кабеля должна не менее чем на 3–5 м превосходить наибольшую глубину исследуемого водоема. Для удобства производства работ кабель размечается марками через каждые 0,5 или 1 м и наматывается на вьюшку. Для подключения кабеля к мосту Р-38 противоположный датчику конец оборудуется электрической вилкой.

7.25. Определение удельной электропроводности воды производится путем измерения сопротивления в залитом ею сосуде Х-38 или погруженным в воду датчиком на реохордном мосту Р-38 и одновременным измерением температуры исследуемой воды с последующим вычислением по формуле

$$\varkappa_{18^\circ} = \alpha K_t 10^6 / R, \qquad (65)$$

где $\varkappa_{18^\circ}$ – удельная электропроводность воды, мкСм/см; α – постоянная сосуда или датчика, $см^{-1}$, которая зависит от размеров и материала электродов и зазора между ними и определяется в процессе тарировки прибора; R – измеренное сопротивление, Ом; K_t – температурный коэффициент для приведения удельной электропроводности к постоянной температуре 18°С. Он может быть рассчитан по формуле

$$K_t = 1 / [1 + 0{,}023\ (t - 18)],$$

где t – температура исследуемой воды, °С.

Для удобства расчета значения K_t, вычисленные по этой формуле, приведены в табл. 17.

7.26. Для измерения температуры пробы воды в сосуде Х-38 при определении удельной электропроводности удобно пользоваться ртутным термометром ТМ-10, укрепляемым в лабораторном штативе так, чтобы при погружении приемника термометра в сосуд он не касался электродов во избежание их повреждения и связанного с этим изменения постоянной α. При измерении электропроводности воды в водоеме датчик кондуктометра удобно спаривать с датчиком электротермометра ГР-41М или любого другого

Таблица 17

Значения коэффициента K_t при температуре воды										
$t°C$	десятые доли градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	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	1,516	1,511	1,505	1,500	1,495	1,490	1,485	1,480
4	1,475	1,470	1,465	1,460	1,455	1,450	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	0,870	0,868	0,867	0,865	0,863
25	0,861	0,859	0,858	0,856	0,854	0,852	0,850	0,848	0,847	0,846

типа). Измерение температуры с точностью до 0,1°С следует выполнять в момент окончания балансировки моста Р-38 с учетом инерционности используемого термометра.

7.27. Для определения постоянной α электролитической ячейки (сосуда Х-38 или датчика кондуктометра) приготавливается контрольный $0{,}001N$ раствор KCl. Раствор должен быть приготовлен из химически чистого хлористого калия, дополнительно дважды перекристаллизованного. Дистиллированная вода для приготовления контрольного раствора должна иметь удельную электропроводность $\varkappa_{дв} \approx 2$ мкСм/см. Хранение раствора во время полевых работ допускается лишь в герметически закупоренном сосуде с минимальной растворимостью (стекло типа "Пирекс" или высококачественные сорта пластмассы).

7.28. Перед тарировкой сосуд Х-38 и датчик кондуктометра без оправы тщательно промывают хромовой смесью, а затем многократно обмывают дистиллированной водой, после чего сосуд заливают свежей дистиллированной водой, а датчик погружают в чисто вымытый химический стакан с дистиллированной водой. Спустя не менее 2–3 ч из сосуда вода выливается, он трижды тщательно ополаскивается контрольным раствором, а затем заполняется им полностью. Датчик кондуктометра ополаскивается последовательно в трех химически чистых стаканах с контрольным раствором, а затем погружается в свежий контрольный раствор так, чтобы электроды располагались в центре его объема в тарировочном стакане. После этого выполняются первые измерения сопротивления и температуры контрольного раствора обеими электролитическими ячейками, а затем вторые, после смены раствора на свежий в сосуде и тарировочном стакане. При неизменных результатах измерения вычисляется постоянная ячейки по формуле

$$\alpha = R_к \varkappa_к \, 10^{-6} / K_t, \qquad (66)$$

где $R_к$ — измеренное сопротивление контрольного раствора, Ом; K_t — температурный коэффициент (см. табл. 17); $\varkappa$ — электропроводность контрольного раствора; $\varkappa = 127 + \varkappa_{дв}$, мкСм/см.

7.29. *После тарировки сосуд и датчик ополаскиваются дистиллированной* водой. Тарировочный датчик должен храниться в дистиллированной воде, а сосуд заполняется ею. Перед измерением, как и перед тарировкой, сосуд должен трижды ополаскиваться водой исследуемой пробы. Тарировка приборов периодически повторяется с частотой, зависящей от интенсивности их эксплуатации, но не чаще одного раза в декаду. При обнаружении деформации электродов обязательна внеочередная тарировка приборов. При соблюдении правил тарировки, хранения и измерения удельная электропроводность воды определяется при помощи сосуда Х-38 с точностью ±2%. Точность определения удельной электропроводности индуктометром от ±4 до ±9%.

Методика наблюдений

7.30. При использовании электропроводности воды в качестве показателя ее минерализации необходимо производить определение удельной электропроводности *во всех пробах, отбираемых для общего солевого анализа.* Это позволяет установить надежные зависимости между обеими характеристиками для каждого исследуемого объекта. При определении удельной электропроводности воды в пробах допускается их хранение в закупоренном виде в течение 7–10 сут, однако производить измерение необходимо сразу же после вскрытия пробы.

7.31. При изучении солевого стока притоков водохранилища отбор проб для определения удельной электропроводности или ее измерение кондуктометром непосредственно в реке при необходимости может производиться одновременно с водомерными наблюдениями: один или два раза в сутки в период межени и многократно в период половодья и паводков. Такая частота наблюдений обеспечивает возможность установления зависимости между удельной электропроводностью воды (следовательно, и ее минерализацией) и расходом воды, что позволяет наиболее точно рассчитать приток растворенных солей и водохранилище.

7.32. При изучении режима концентрации главных ионов и минерализации воды в водохранилище в районе проектируемого гидротехнического сооружения назначается одна или несколько вертикалей, закрепляемых буями. Наблюдения производятся с плавсредства, швартующегося к бую. Наблюдения целесообразно начинать с зондирования водной толщи кондуктометром и электротермометром. Такие измерения выполняются на горизонтах 0,1 (при штиле); 0,5; 1,0 м и далее через 1 м вплоть до природного горизонта (0,5 м от дна). В слоях с сильным изменением сопротивления воды (это слои температурного скачка или скачка минерализации) наблюдения производятся на дополнительных горизонтах – через 0,5 или даже 0,25 м глубины. При измерениях удельной электропроводности в слоях со значительными градиентами измеряемых параметров особенно важна одновременная фиксация величин сопротивления и температуры воды из-за нередко наблюдающихся вертикальных перемещений этих слоев. При случайном погружении датчиков в ил следует их поднять на поверхность и тщательно обмыть забортной водой.

7.33. По окончании зондирования рассчитывается удельная электропроводность воды (см. п. 7.25) на каждом горизонте измерения и затем отбираются пробы воды на химический анализ в поверхностном горизонте и 1–2 горизонтах, в которых обнаружено наиболее существенное (превышающее 10%) изменение величины удельной электропроводности по сравнению с поверхностным горизонтом. В отобранных пробах определяется pH, удельная электропроводность при помощи сосуда Х-38 и концентрация главных ионов методами химического анализа. При накоплении достаточного

числа таких анализов для установления зависимости между минерализацией воды и ее удельной электропроводностью регулярные анализы солевого состава воды могут быть заменены эпизодическими лишь тех проб, удельная электропроводность которых существенно выше или ниже диапазона значений, использованных для выявления упомянутой зависимости.

7.34. Частота наблюдений на вертикалях назначается с учетом гидрологической структуры водохранилища (расположения водных масс в водоеме, зон их контакта и смещения, степени стратифицированности водной толщи и т.д.), динамики водных масс (интенсивности и устойчивости стоковых течений, ветровых циркуляций, наличия плотностных течений), расстояния до ближайшего источника загрязнения, его мощности и т.д. В зависимости от перечисленных условий и необходимой степени детальности изучения режима минерализации частота вертикального зондирования может составлять от одного раза в декаду до нескольких раз в сутки, так как время одного зондирования составляет от 5 до 30 мин в зависимости от глубины вертикали, степени расслоенности водной толщи и инерционности датчика температуры (датчик кондуктометра практически безынерционен).

7.35. Для изучения распределения минерализации в районе предполагаемого водозабора или другого гидротехнического сооружения, а также для оконтуривания района распространения загрязнений в поверхностном слое водохранилища могут быть применены маршрутные съемки электропроводности. В таких съемках кондуктометр и электротермометр погружаются в воду и измерения выполняются во время движения судна по поперечникам, галсам или веерным разрезам, исходящим из пункта размещения проектируемого сооружения или точки с наибольшей концентрацией загрязняющих веществ с фиксацией положения судна на плане водоема в момент измерения сопротивления и температуры воды. При отсутствии кондуктометра пробы воды достаются из-за борта чистым ведром через заданные интервалы времени. Добытой водой заполняют сосуд Х-38, измеряют в нем сопротивление и температуру воды и рассчитывают величину удельной электропроводности.

Обработка материалов наблюдений

7.36. В результате полного химического анализа солевого состава каждой пробы воды устанавливается концентрация в ней ионов HCO_3^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ и K^+, мг-экв/л.

Суммарная ошибка гидрохимического анализа рассчитывается как разность суммарных концентраций анионов и катионов, выраженная в миллиграмм-эквивалентах на литр. Относительная величина этой ошибки равна отношению указанной разности к суммарной концентрации всех ионов и выражается в процентах. В настоящее время нет норматива допустимой величины суммарной ошибки анализа пробы воды. Многолетний опыт изучения солевого состава воды водохранилищ бассейна Волги показывает, что для вод с суммарной концентрацией ионов около 5 мг-экв/л можно считать результаты химического анализа пробы воды удовлетворительными при величине относительной ошибки не более 5%. При большем ее значении велика вероятность существенной погрешности определения концентрации одного или нескольких ионов, что может быть устранено повторным выборочным определением содержания в пробе отдельных ионов. Следует иметь в виду, что при суммарной концентрации ионов в воде более 5 кг мг-экв/л значение допустимой относительной ошибки анализа следует уменьшать, при концентрации менее 5 мг-экв/л – увеличивать до 10% и более для ультрапресных вод.

По окончании выверки результатов химического анализа воды концентрация всех ионов путем пересчета выражается в мг/л, а затем суммированием полученных величин находится значение минерализации воды.

7.37. В измеренные в полевых условиях значения pH воды вводится солевая поправка. Эта поправка для фосфатных буферных растворов с индикатором бромтимоловым синим в диапазоне минерализации воды от 200 мг/л до 1,2 г/кг равна 0,2 единицы pH, в диапазоне от 1,2 до 2,7 г/кг равна 0,1, для борноборатных буферных растворов с индикатором крезоловым красным эта поправка в диапазоне минерализации воды от 200 до 750 мг/л равна 0,2, от 750 мг/л до 2,12 г/кг равна 0,1; для боратных буферных растворов с индикаторами крезоловым красным и тимоловым синим солевая поправка вводится при определении pH только в солоноватых водах: при минерализации от 5 до 15 г/кг она равна −0,1, при больших значениях минерализации – 0,2 единицы pH.

7.38. По окончании отдельных этапов режимных наблюдений или съемок в камеральных условиях выполняется повторный расчет значений удельной электропроводности воды, определенных с помощью кондуктометра и электротермометра.

Для уменьшения возможных систематических и исключения грубых случайных ошибок в определении величин удельной электропроводности воды с помощью кондуктометра (первые из них возникают за счет постепенного загрязнения электродов, их незаметных деформаций, а также погрешностей при тарировке датчиков, вторые – за счет ошибок наблюдателя) на миллиметровой бумаге строится график связи между значениями удельной электропроводности, измеренными в пробах воды с помощью сосуда Х-38, и ее значениями, измеренными кондуктометром в точках отбора соответствующих проб воды. По точкам, нанесенным в поле такого графика, проводится линия связи (обычно прямая); ее отклонение от биссектрисы координатного угла свидетельствует о наличии систематической ошибки полевого метода измерения удельной электропроводности воды. В данном случае, используя этот график, следует составить таблицу поправок к величинам, измеренным кондуктометром, для последующего приведения их к значениям лабораторного определения удельной электропроводности, принимаемым за эталон. Кроме того, анализируется причина наиболее сильного отклонения отдельных точек от линии связи; при обнаружении ошибок измерения или расчета соответствующие данные исправляются либо бракуются.

7.39. Величину минерализации воды по значению удельной электропроводности в исследуемом водном объекте можно получить, построив график связи между этими характеристиками, определенными в одних и тех же пробах воды. Для большей точности и оценки погрешности косвенного определения минерализации этим методом рассчитываются параметры уравнения регрессии методом парной корреляции. При сравнительно небольшой внутригодовой изменчивости ионного состава воды, характерной для многих рек и водохранилищ, достаточно надежные связи устанавливаются также между удельной электропроводностью и концентрацией в ней главных ионов (HCO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+). В качестве примера приведены такие зависимости для Можайского водохранилища:

$\Sigma_и = 1{,}08\,\varkappa_{18°} - 25$	$\delta = \pm 10$	$n = 390$	$r = 0{,}99$
$HCO_3^- = 0{,}82\,\varkappa_{18°} - 37$	$\delta = \pm 9$	$n = 390$	$r = 0{,}99$
$Ca^{2+} = 0{,}18\,\varkappa_{18°} - 4$	$\delta = \pm 3$	$n = 390$	$r = 0{,}98$
$Mg^{2+} = 0{,}05\,\varkappa_{18°} - 2$	$\delta = \pm 1$	$n = 390$	$r = 0{,}97$
$Na^+ = 0{,}016\,\varkappa_{18°} + 0{,}4$	$\delta = \pm 0{,}5$	$n = 361$	$r = 0{,}93$.

Здесь $\Sigma_и$ – минерализация воды как и концентрация отдельных ионов, мг/л; $\varkappa_{18°}$ – удельная электропроводность воды, мкСм/см; δ – средняя ошибка уравнения регрессии; n – число использованных для расчета проб воды; r – коэффициент корреляции.

Приведенные уравнения действительны в диапазоне удельной электропроводности 90–500 мкСм/см. Относительная средняя квадратическая ошибка расчета минерализации воды по величине удельной электропроводности равна около ±6%.

7.40. При наличии данных режимных наблюдений за электропроводностью воды на притоках водохранилища, используя уравнения, подобные приведенным выше, можно установить аналитическую форму зависимости между расходом воды в реке и минерализацией воды или концентрацией в ней главных ионов. Например, для притоков Можайского водохранилища такие уравнения имеют вид:

р. Москва $\Sigma_и = 419{,}7\, Q^{-0{,}34}$; $n = 107$; $r = -0{,}97$;
р. Лусянка $\Sigma_и = 283{,}5\, Q^{-0{,}38}$; $n = 90$; $r = -0{,}97$.

Здесь Q – расход воды, м^3/с; r – коэффициент корреляции логарифмов значений $\Sigma_и$ и Q

Располагая данными о среднесуточных расходах воды притока и подобными уравнениями, можно с достаточной степенью достоверности определить минерализацию воды в дни пропуска гидрохимических наблюдений, рассчитать ежесуточное поступление солей в водохранилище, а также за любой более продолжительный период.

7.41. Условная плотность воды в водохранилище рассчитывается по уравнению

$$\sigma_{tx} = \sigma_t + \Delta\sigma_x,$$

где σ_{tx} – условная плотность воды, вычисленная с учетом ее температуры и минерализации; σ_t – условная плотность дистиллированной воды при измеренной в водоеме температуре t°С; $\Delta\sigma_x$ – минерализационная поправка, определяемая по величине удельной электропроводности воды $\varkappa_{18°}$, мкСм/см.

Величина σ_t в соответствии с измеренной в водоеме температурой определяется по данным табл. 18. При любой температуре она имеет отрицательное значение (для сокращения записи в табл. 18 знак минус опущен).

Таблица 18

Условная плотность дистиллированной воды σ_t при температуре воды

t°C	десятые доли градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	132	126	119	113	107	101	95	89	84	78
1	73	68	64	59	55	50	46	43	39	35
2	32	29	26	23	20	18	16	13	11	9
3	8	6	5	4	3	2	1	1	0	0
4	0	0	0	1	1	2	3	4	5	7
5	8	10	12	14	16	18	21	23	26	29
6	32	35	38	42	46	50	54	58	62	66
7	71	75	80	85	90	96	101	107	112	118
8	124	130	136	143	149	156	163	170	177	184
9	192	199	207	215	222	231	239	247	256	264
10	273	282	291	300	309	319	328	338	348	358
11	368	378	388	399	409	420	431	442	453	464
12	475	487	498	510	522	534	546	558	571	583
13	596	607	621	634	648	661	674	688	701	715
14	729	743	757	771	785	800	814	829	844	859
15	874	889	904	919	935	900	966	982	998	1014
16	1030	1047	1063	1080	1096	1113	1130	1147	1164	1181
17	1199	1216	1234	1251	1269	1287	1305	1323	1341	1360
18	1378	1397	1415	1434	1453	1472	1491	1510	1530	1549
19	1568	1588	1608	1628	1648	1668	1688	1708	1729	1749
20	1770	1790	1811	1832	1853	1874	1895	1917	1938	1960
21	1981	2003	2025	2047	2069	2091	2113	2136	2158	2181
22	2203	2226	2249	2272	2295	2318	2342	2365	2388	2412
23	2436	2459	2483	2507	2531	2555	2580	2604	2628	2653
24	2676	2702	2727	2752	2777	2802	2827	2853	2878	2904
25	2929	2955	2981	3006	3032	3059	3085	3111	3137	3164

Продолжение табл. 18

Условная плотность дистиллированной воды при температуре воды										
t°C	десятые доли градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
26	3190	3217	3244	3270	3297	3324	3352	3379	3406	3433
27	3461	3488	3516	3544	3572	3600	3628	3656	3684	3712
28	3741	3769	3798	3826	3855	3884	3913	3942	3971	4000
29	4029	4059	4088	4118	4147	4177	4207	4257	4267	4297
30	4327									

Примечание. Значения σ_t отрицательные.

Величина $\Delta\sigma_{\varkappa}$ для вод гидрокарбонатного класса, к которому относятся воды большинства водохранилищ, приведена в табл. 19.

Таблица 19

Значения $\Delta\sigma_{\varkappa}$ при удельной электропроводности воды, мкСм/см										
Десятки	Единицы									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	1	2	3	3	4	5	6	6	7
10	8	9	9	10	11	12	12	13	14	15
20	16	17	18	19	20	20	21	22	23	24
30	25	25	26	27	28	29	30	30	31	32
40	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41
50	42	42	43	44	45	46	46	47	48	49
60	50	50	51	52	53	54	55	55	56	57
70	58	59	60	61	62	63	64	65	66	66
80	67	68	69	70	70	71	72	73	74	75
90	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83
100	84	85	85	86	87	88	89	90	90	91
110	92	93	94	95	96	97	98	99	100	100
120	101	102	103	104	105	105	106	107	108	109
130	110	110	111	112	113	114	115	115	116	117
140	118	119	120	120	121	122	123	124	125	126
150	127	128	129	130	131	132	133	134	135	135
160	136	137	138	139	140	140	141	142	143	144
170	145	146	147	148	149	150	150	151	152	153
180	154	155	155	156	157	158	159	160	160	161
190	162	163	164	165	165	166	167	168	169	170
200	171	172	173	174	175	175	176	177	178	179
210	180	181	182	183	184	185	185	186	187	188
220	189	190	190	191	192	193	194	195	196	197
230	198	199	200	200	201	202	203	204	205	206
240	207	208	209	210	210	211	212	213	214	215
250	215	216	217	218	219	220	220	221	222	223
260	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233
270	234	235	236	237	238	239	240	240	241	242
280	243	244	245	246	247	248	249	250	250	251
290	252	253	254	255	256	257	258	259	260	260
300	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
310	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279
320	279	280	281	282	283	284	285	285	286	287
330	288	289	290	290	291	292	293	294	295	296
340	297	298	299	300	300	301	302	303	304	305
350	306	307	308	309	310	310	311	312	313	314
360	315	316	317	318	319	320	320	321	322	323
370	324	325	325	326	327	328	329	330	330	331

Значения $\Delta\sigma_{t\varkappa}$ при удельной электропроводности воды, мкСм/см										
Десятки	Единицы									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
380	332	333	334	335	336	337	338	339	340	340
390	341	342	343	344	345	345	346	347	348	349
400	350	350	351	352	353	354	355	355	356	357
410	358	359	360	360	361	362	363	364	365	365
420	367	368	369	370	370	371	372	373	374	375
430	375	376	377	378	379	380	380	381	382	383
440	384	385	386	387	388	389	390	390	391	392
450	393	394	395	396	397	398	398	399	400	401
460	402	403	404	405	406	407	407	408	409	410
470	411	412	413	414	415	416	416	417	418	419
480	420	421	422	423	424	425	425	426	427	428
490	429	430	431	432	433	434	434	435	436	437
500	438									

Рассчитав условную плотность воды как алгебраическую сумму двух перечисленных слагаемых, по формуле

$$\rho = 1000 + \sigma_{t\varkappa} / 1000$$

вычисляется плотность воды, кг/м^3. Например, на горизонте 20 м температура была равна 10,8°С, а ее удельная электропроводность составляла 186 мкСм/см. Условная плотность этой воды $\sigma_{t\varkappa} = -384 + 159 = -225$ (см. табл. 18 и 19), следовательно, плотность воды $\rho = 999{,}775$ кг/м^3.

Анализ результатов наблюдений

7.42. Данные химического анализа проб воды, материалы наблюдений за температурой и удельной электропроводностью воды, а также рассчитанные значения минерализации и плотности воды анализируются с целью выявления тех особенностей химического состава воды, режима минерализации и плотности воды, которые имеют значение для проектирования и последующей эксплуатации гидротехнического сооружения.

7.43. Установленные значения концентрации главных ионов и величины pH используются для оценки степени агрессивного воздействия воды на конструкции сооружений путем сопоставления с величинами показателей агрессивности воды – среды, приведенными в главе СНиП по защите строительных конструкций от коррозии.

7.44. Для анализа режима минерализации воды в притоках водохранилища вычерчивается график годового хода удельной электропроводности воды. В том же горизонтальном масштабе на него наносят гидрограф реки в изучаемом створе. Для таких графиков характерна, как правило, противофазность колебания величин расхода и удельной электропроводности воды: в паводки и половодья минерализация электропроводность (удельная) уменьшаются, в межень – возрастают. Отдельные пики значений удельной электропроводности на таком графике анализируются особенно тщательно, так как они могут свидетельствовать о залповых или аварийных сбросах загрязняющих веществ.

7.45. О характере изменения минерализации воды по глубине дают наглядное представление графики вертикального распределения удельной электропроводности воды. Еще более наглядную информацию о режиме минерализации в районе предполагаемого водозабора могут дать графики, по оси абсцисс которых откладывается время, а по оси ординат –

глубина водохранилища при НПГ. В поле такого графика наносится линия, показывающая изменение уровня воды в водоеме относительно НПГ, а от нее вниз в соответствии с вертикальным масштабом графика точками наносятся горизонты измерения электропроводности воды в моменты наблюдений. Около этих точек указываются рассчитанные значения удельной электропроводности воды и между ними интерполяцией проводятся линии равной электропроводности (удельной). Градации этих изолиний выбираются исходя из диапазона изменения удельной электропроводности на вертикали в течение периода измерений и величины вероятной погрешности определения этой характеристики, указанной в п. 7.29. На таких графиках наиболее легко заметить периоды увеличения минерализации в природных слоях за счет проникания в район изучения речных вод или распространения загрязненных вод. При анализе причин изменения минерализации воды в изучаемом районе необходимо обращать внимание на характер изменения гидрометеорологического режима водохранилищ в наиболее неблагоприятные периоды, выявленные с помощью такого графика.

7.46. Для анализа распространения загрязнений в поверхностном слое по материалам маршрутной съемки целесообразно составить план распределения удельной электропроводности воды в изучаемом районе. Правила проведения изолиний на таких планах те же, что и на графиках, описанных выше. Благодаря применению экспресс-метода определения минерализации воды по ее удельной электропроводности можно осуществлять такие съемки в течение коротких промежутков времени, что повышает качество и надежность картографической интерпретации материалов наблюдений. Путем сравнения планов нескольких последовательно выполненных съемок при различных гидрометеорологических условиях можно судить о режиме распространения и разбавления в водной массе водохранилища загрязненных вод.

8. ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ НАНОСОВ

8.1. На водохранилищах в зонах постоянного подпора движение наносов вблизи берегов происходит в основном под действием ветровых волн и связанных с ними течений. Характер и интенсивность перемещения прибрежных наносов, их количество зависят также от уровня воды, гранулометрического состава, удельного веса и формы частиц наносов, формы и размеров прибрежной отмели. Многофакторность процесса движения наносов определяет сложность его изучения, необходимость постановки комплекса работ.

8.2. По характеру трансформации волн и перемещению наносов в прибрежной полосе водохранилища выделяются три зоны. Первая – зона трансформации волн, ограничиваемая со стороны водоема глубиной, равной 0,5 $\bar{\lambda}$ (где $\bar{\lambda}$ – средняя длина волны), а со стороны берега критической глубиной ($H_{кр} = 2\bar{h}$, где $\bar{h}$ – средняя высота волн). В этой зоне отмечается незначительное перемещение наносов с образованием на дне ряби. Вторая – прибойная зона, которая со стороны водоема ограничивается $H_{кр}$ и со стороны берега глубиной последнего обрушения волн. Третья – зона наката волн. Массовое перемещение наносов во время волнения происходит в последних двух зонах и приурочено к валам. При отсутствии валов перемещение наносов происходит равномерно в пределах двух зон с большей концентрацией в зоне максимального разбивания волн.

Характер перемещения наносов тесно связан с направлением движения волн над отмелью. При нормальном подходе волн к берегу на отмели перемещение наносов осуществляется под влиянием асимметричного возвратно-поступательного движения воды. На этот вид движения накладывается медленный отток воды в глубь водоема. В период развития шторма в зоне наката происходит некоторое перемещение наносов вниз по склону и отмечается размыв пляжа. В период затухания шторма происходит обратная картина, т.е. подача наносов в прибойную зону. Наиболее крупные фракции накапливаются в верхней части пляжа.

При косом подходе волн к берегу в прибойной зоне вдольбереговое перемещение наносов осуществляется под действием ветро-волновых тече-

ний и в зоне наката под действием прибоя. Вдольбереговое перемещение наносов происходит полосой, береговая и мористая границы которой соответствуют верхнему и нижнему пределам размывающего действия волн. Для галечных наносов пределы размывающего действия волн меньше, чем для песчаных. В зависимости от степени насыщения наносами различают зоны дефицита, транзита и аккумуляции наносов.

Песчаные наносы перемещаются во взвешенном состоянии, скачкообразно, а также путем влечения по дну небольшого по мощности слоя наносов; галечные наносы – путем влечения и скачкообразно.

8.3. При выборе участка для изучения динамики наносов в месте проектирования или строительства гидротехнических сооружений весьма важно правильное определение его границ. Границами участка могут служить глубокие заливы, являющиеся обычно "непропусками" для вдольбереговых наносов, или специально созданные прорези.

После выбора участка наблюдений производится топографическая съемка его с нивелированием в надводной и промерами в подводной части берегового склона и ложа водохранилища. Результаты съемки оформляются в виде топографического плана в масштабе 1:500 – 1:2000 в зависимости от сложности и протяженности участка, а также задач изысканий.

Для изучения поступления твердого материала в прибрежную зону за счет размыва берега на участке разбиваются створы, количество которых зависит от геолого-геоморфологических и гидродинамических условий. С учетом тех же условий выбираются створы для определения подвижного слоя наносов, отбора проб взвешенных наносов, для изучения направлений и скоростей течений при различных волновых характеристиках. Обычно такие створы располагаются в зонах дефицита, транзита и аккумуляции наносов.

8.4. Для определения состава и сортированности донных наносов и размываемых пород отбираются образцы из берегового обрыва, а также из прибрежной отмели и ложа водохранилища. Из берегового обрыва образцы могут отбираться послойно, в отдельных точках или равномерно сверху вниз. Монолиты должны быть размером не менее 20x20x20 см, а масса образцов с нарушенной структурой – до 1 кг. С пляжа обычно берется средняя проба, которая содержит порции из поверхностного слоя наносов, взятых по всей ширине пляжа, толщиной 1–3 см.

Отбор проб донного грунта с поверхности дна производится в зависимости от глубин, гранулометрического состава грунта и технической оснащенности экспедиции следующими устройствами: стругом СПГ-59, грунтовыми щупами и малыми дночерпателями – с поверхности подводного берегового склона; дночерпателями "Океан – 0,1/0,25" и драгами – с поверхности ложа водоема. Отбор грунтовых колонок выполняется грунтовыми трубками: ударными прямоточными обычного типа и типа "долото", вибропоршневыми, трубками для отбора проб на ходу судна ТНХ-Т и ТНХ-Л, легкими поршневыми и поршневыми типа ПГТ-56 и ПБГТ-58 и др.

Подробность отбора донных проб грунта регламентируется рельефом дна обследуемого участка. Так, на подводном береговом склоне отбор должен быть выполнен в прибойной зоне по элементам подводных валов (гребни, ложбины) и дальше от берега, включая зону контакта отмели и ложа водоема, а также иные формы рельефа. Количество проб зависит еще и от задач изысканий.

Общая оценка литологического состава грунтов дна может быть выполнена с помощью осциллографа, синхронизированного с эхолотом, по различиям в характере отраженного эхо-импульса относительно эталонного.

На все отобранные и упакованные образцы составляется специальный журнал с записью (по этикеткам на образце) места и даты взятия образца.

В зависимости от решаемой задачи образцы в лабораторных условиях подвергаются гранулометрическому, минералогическому, палеонтологическому, химическому и другим видам анализа. Непосредственно при отборе органолептически устанавливаются: цвет, механический состав, консистенция, пластичность, наличие и характер включений, текстура грунтов. По результатам гранулометрического анализа строятся кумулятивные кривые

и высчитываются медианный диаметр, коэффициенты сортировки и асимметрии.

8.5. Наблюдения за динамикой наносов в прибрежной зоне выполняют в безледный период. Во время отдельных штормов производится комплекс работ, включающий измерения скорости и направления ветра, скорости и количества перемещаемых наносов. Отмечается угол подхода волн к берегу, характер трансформации волн на отмели, граница забурунивания и разбивания волн, положение внешней границы взмучивания, характер движения наносов. После шторма по створам производят промеры глубин через 1 м на отмели до глубины, равной 0,5 м от максимальной длины волны, и измерения по стержням мощности активного слоя донных наносов.

Пробы воды на мутность отбираются батометрами различных конструкций в зоне наката волн, прибойной зоне и зоне трасформации волн. Места и способ отбора зависят от силы, продолжительности и устойчивости волнения, состава наносов и рельефа прибрежной отмели. При длительном установившемся волнении и глубинах более 0,4 м пробы отбираются на трех или пяти горизонтах (у поверхности, на глубине 0,2 Н; 0,6 Н; 0,8 Н и у дна). При неустойчивом волнении, а также при глубинах менее 0,4 м применяется интеграционный способ отбора. Кроме того, производится отбор взвешенных наносов для определения гранулометрического состава.

Объем пробы на мутность устанавливают из расчета, чтобы при последующем фильтровании осадок наносов на фильтре был бы массой не менее 0,1 г. Необходимые для этого объемы проб в зависимости от преобладающей мутности определяются по данным табл. 20.

Таблица 20

Преобладающая мутность, г/м^3	Объем пробы, л
Более 100	Не менее 1
50 – 100	2
20 – 50	5
Менее 20	10

Объемы пробы воды для определения гранулометрического состава зависят от мутности воды и от того, какая масса наносов требуется для проведения анализа. При анализе методом фракциометра навеска должна составлять 0,5 – 2,0 г, при анализе методом "пипетка – фракциометр" – 2–7 г, при анализе микроагрегатным способом – 10–30 г. Объемы пробы в литрах определяются по формуле

$$V = 100\,a/\rho,$$

где a – величина требуемой навески, г; ρ – мутность воды, г/м^3.

Наиболее полно, вне зависимости от погодных условий, весь комплекс указанных выше работ может быть осуществлен со сквозных эстакад.

8.6. Для изучения активного слоя наносов, состоящих из гальки, применяются рейки А.М.Жданова. Рейка с кругом на нижнем конце крепится к глубоко вбитому в дно штырю так, чтобы было возможно ее свободное перемещение по вертикали. Перед штормом фиксируется положение рейки, упирающейся в дно. При волнении в моменты углубления дна рейка под собственной тяжестью опускается. Разность между положением рейки до и после шторма есть толщина активного слоя наносов, а показания по нескольким рейкам, размещенным по поперечному к берегу створу, позволяют определить сечение этого слоя.

Для измерения мощности активного слоя в песчаных наносах применяются штыри с надетыми на них металлическими кольцами. Перед штормом производится нивелировка дна по створам, закрепленным штырями, и измеряется высота штырей над дном. Во время шторма наносы перемещают-

ся и соответственно происходит опускание колец на штырях. Максимальная величина опускания соответствует середине шторма. При уменьшении силы шторма наносы начинают аккумулироваться и закрывают кольца. После шторма производятся вторичная нивелировка дна и замер у штырей толщины слоя накопившегося материала. Затем кольца возвращают на поверхность дна. В результате определяется мощность активного слоя, слоя намытого и смытого песка.

Используя данные по динамике активного слоя наносов и зная скорость течения и перемещения наносов, можно определить для отдельных створов расход и сток наносов во время шторма, а также подсчитать баланс наносов для всего участка изысканий.

8.7. Определение скорости перемещения галечных наносов производится с помощью галек, которые окрашивают в разные цвета и выбрасывают в количестве не менее 100 шт. перец штормом на разные глубины в пределах прибойной зоны и зоны наката. После шторма организуется поиск галек и составляется схема их расположения, на основании которой вычисляется средняя и максимальная скорости перемещения окрашенных галек.

Для определения скорости движения песчаных наносов используется песок, меченный люминофорами. На изучаемом участке выбирается место выброса меченых частиц и на расстоянии 50 и 100 м разбиваются поперечники с закрепленными на них точками отбора проб грунта, которые приурочиваются к различным элементам профиля отмели.

В целях безопасности при отсутствии эстакады или канатной дороги наблюдения выполняют в штормы с высотой волн не более 1 м. Перед выбросом песка проводят контрольные измерения скорости течения, которые необходимы для определения сроков отбора проб. Затем делается выброс песка и почти сразу отбираются образцы на точках по первому и второму створам, начиная с уреза. Отбор на каждой точке производится через заданный интервал времени. После шторма должны быть повторные измерения глубин с отбором проб.

При просушке образцы рассеиваются по фракциям и просматриваются под ультрафиолетовым светом. Количество просматриваемого образца определяется опытным путем по степени насыщения песка мечеными частицами. Результаты подсчета количества окрашенных песчинок в пробах наносятся на план и определяются максимальная и средняя скорости их перемещения по отдельным фракциям и пути перемещения по отмели. Вместе с этим изучаются гранулометрический состав и распределение наносов по крупности на отмели.

Описание методики работ с окрашенными наносами приводится в Руководстве по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях (М.: Гидрометеоиздат, 1975).

8.8. Мощность вдольберегового потока наносов (количество материала, перемещаемого через данный створ за год) можно определить на основании систематических наблюдений за всеми подвижными наносами в течение безледного периода, т.е. путем замеров мощности активного слоя наносов, определений мутности воды и состава наносов, промеров глубин по профилям. Одновременно с промерами производится отбор проб донных наносов и пород, слагающих берег, для определения их плотности.

Кроме того, используется геоморфологический анализ аккумулятивных форм рельефа в береговой зоне, которые служат наилучшими индикаторами динамики береговой зоны. По плановым очертаниям аккумулятивных форм определяется направление равнодействующей волнового режима и направление преобладающего перемещения наносов.

Для оценки стока наносов весь изучаемый участок разбивается на подучастки, выделение которых производится по морфологическим признакам. Для каждого подучастка графическим путем определяется наносодвижущая сила волнения в зависимости от величины равнодействующей и углов подхода волн к берегу, а по данным натурных наблюдений (результатам совмещенных профилей последовательных промеров) устанавливаются объемы размыва и аккумуляции.

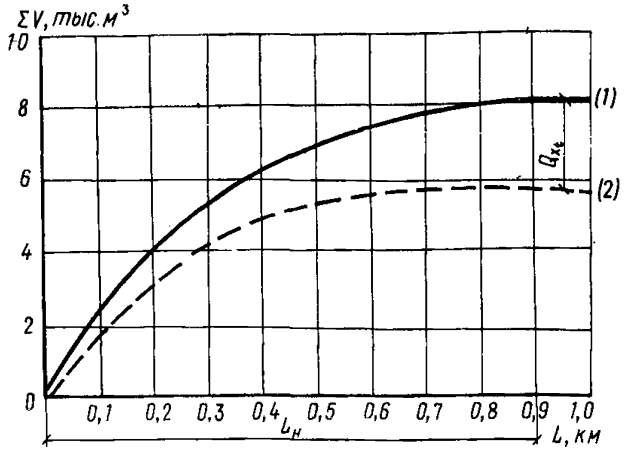


Рис. 9. Совмещенные кривые объемов деформаций
1 – кривая объемов размыва; 2 – кривая объемов аккумуляции; Q_{xt} *– сток наносов*

Объем береговых переформирований между створами вычисляется как произведение полусуммы площадей размыва или аккумуляции смежных профилей на расстояние между ними.

Сток наносов подсчитывается по формуле

$$Q_{xt} = V_p - V_a K + Q'_{xt}, \qquad (67)$$

где V_p – объем размыва, м³; V_a – объем аккумуляции, м³; Q'_{xt} – сток наносов с соседнего подучастка, м³; для начального подучастка эта величина равна нулю;

$$K = \rho_a / \rho_p,$$

где ρ_a и ρ_p – соответственно плотность грунта в зонах аккумуляции и размыва.

Последовательным суммированием стока наносов по отдельным подучасткам рассчитывается сток наносов в конце исследуемого участка.

Определение стока удобно производить по совмещенным кумулятивным кривым, которые строятся последовательным суммированием объемов размыва и аккумуляции, заключенных между расчетными профилями, по длине участка в направлении потока наносов (рис. 9, кривые *1* и *2*).

Расстояние между начальным створом и створом, за пределами которого кривые располагаются примерно параллельно, определяет длину зоны насыщения $\mathcal{L}_н$, а разность ординат кривых (*1*) и (*2*) в конце этого участка – сток наносов Q_{xt} (рис. 9).

Если по результатам промеров и действию скоростей течений зафиксированы противоположные перемещения наносов, то величина Q_{xt} определяется по разности стока в том и другом направлениях.

8.9. Для расчета количества перемещаемого грунта q_{yx} можно использовать уравнение баланса (28)

$$Q_p + q_{пр} = q_{yx} + \beta Q_p + Q_a, \qquad (68)$$

где Q_p – объем размытого грунта, м³; $q_{пр}$ – объем грунта, поступившего с соседнего участка, м³; q_{yx} – объем грунта, перемещаемого вдольбереговыми течениями с данного участка на последующий, м³; Q_a – объем аккумулированного грунта, м³; β – коэффициент уноса грунта в глубь водоема

(эта величина может быть представлена как $(1-\alpha)$, где α – коэффициент аккумуляции грунта, равный отношению объема аккумулированного грунта к объему размываемого.

Все эти величины находятся в результате натурных наблюдений и прежде всего по данным съемок береговой и подводной части отмели, производимых повторно в течение сезона волнения.

Для первого участка q_{yx} грунта определяется следующим образом:

$$q_{yx} = a\,Q_{p_1},$$

где a – коэффициент эффективного переноса грунта, равный отношению наносодвижущей энергии волнения к равнодействующей; Q_{p_1} – объем грунта, размытого на участке 1.

8.10. Расчет стока наносов может быть произведен также по методу ИГМ АН УССР.

Формула для определения стока наносов за длительный период в данном методе имеет следующий вид:

$$Q_{xt} = \pm\left(A/m^{0,75}\right)\sqrt{g/d}\sum^{h}\sum^{\alpha} h_0^2\,\lambda_{cp}\,t\sin 2\alpha_0, \qquad (69)$$

где Q_{xt} – вдольбереговой сток наносов за t суток действия шторма, м^3; $A = 9{,}05$ – коэффициент, установленный на основе теоретического и экспериментального исследований; h_0 – высота волны на "глубокой" воде обеспеченностью в группе 1%, м; λ_{cp} – средняя длина волны в группе на "глубокой" воде, м; d – средняя крупность наносов, м; g – ускорение силы тяжести, м/с^2; m – коэффициент откоса, равный $\operatorname{ctg}\gamma$ (где γ – угол откоса с горизонтом, град); α_0 – угол луча волны с нормалью к линии берега, град.

Уравнение можно преобразовать, что позволит установить места аккумуляции, транзита и размыва наносов. Годовая величина суммарного переноса грунта может быть определена как алгебраическая сумма объемов вдольбереговых перемещений наносов, вызываемых волнением всех румбов;

$$Q_{xt} = \pm\Sigma Q_p, \qquad (70)$$

где Q_p – объем перемещения наносов отдельного румба, м^3,

$$Q_p = \pm\Sigma T\sin 2\bar{\theta}, \qquad (71)$$

где θ – угол подхода волн к берегу ($\bar{\theta}$ – абсолютное его значение);

$$\theta = \pm(A_н - A_p), \qquad (72)$$

где $A_н$ – азимут нормали к берегу; A_p – азимут волнения.

Если получится угол более 90°, то

$$\theta = +(A_н - A_p) - 360^\circ \qquad (73)$$

или

$$\theta = -(A_н - A_p) + 360^\circ. \qquad (74)$$

Знак при θ показывает направление движения наносов. Если встать лицом к водохранилищу, то положительное значение θ показывает, что наносы движутся слева направо, отрицательное значение – наоборот, справа налево.

$$T = 1{,}04\,h^2\lambda t\sqrt{g/d}, \qquad (75)$$

где h – высота волны соответствующего интервала скорости ветра, м; λ – длина волны для того же интервала скорости ветра, м; t – время действия ветра (сутки), который вызывает волны с параметрами h и λ;

$g = 9{,}81$ м/с^2.

T определяется для каждого интервала скорости ветра действующего румба.

Такие расчеты выполняются для каждого подучастка.

К аккумулятивным и транзитным подучасткам следует отнести те подучастки, расход на которых отвечает условию

$$Q_n \leqslant Q_{n-1}, \tag{76}$$

где Q_{n-1} – расход наносов на верхнем по отношению к потоку наносов подучастке.

8.11. Известен также метод расчета $Q_{x,t}$, разработанный Г.С.Башкировым.

По уравнениям гидродинамики и на основании данных, полученных при исследовании заносимости портов и каналов, Г.С.Башкиров предложил для расчета объема перемещаемых наносов ($W, м^3$) следующую формулу:

$$W = (1/\rho_н) \overline{H} \Delta X \overline{V} t \sum_{i=1}^{n} S_{ср.н} \cdot 10^{-6}, \tag{77}$$

где $\rho_н$ – плотность наносов, т/м^3; H – средняя глубина в полосе вдольберегового потока шириною ΔX, м; V – осредненная скорость течения (м/с), рассчитываемая по формуле

$$V = V' + V'' = 0{,}015 V_в + 0{,}24 V_в \sin\alpha; \tag{78}$$

здесь $V_в$ – скорость ветра, м/с; α – угол подхода волн к линии берега, град; $\sum_{i=1}^{n} S_{ср.н}$ – средняя за время t мутность, г/м^3, определяемая по выражению:

$$\sum_{i=1}^{n} S_{ср.н} = \sum_{i=1}^{n} \cdot 1000 p_i h/\delta H \left[1 + \left(\frac{75 w_i}{K_f V_n}\right)^{1{,}76}\right], \tag{79}$$

где p_i – содержание частиц i-й фракции в грунте дна в долях единиц; K_f – коэффициент трения; w_i – гидравлическая крупность i-й фракций, м/с; h/δ – высота, м, и крутизна волны; H – глубина водоема, м.

8.12. Сток наносов $Q_{x\,t}$ может быть определен еще по кривым распределения.

Располагая данными по волновому спектру, скоростями течения и натурными материалами по физико-механическим свойствам грунтов дна, следует сначала рассчитать распределение концентрации наносов по длине поперечного створа по формуле (79). Затем, умножив значение средней суммарной концентрации наносов на глубину, скорость потока и время действия шторма, получим объем наносов на всем рассчитываемом створе. Аналогичный результат можно получить графически. Построив эпюры распределения $\Sigma S, \Sigma V$ и имея поперечный профиль дна по створу, умножим по длине створа ординаты ΣS и ΣV на соответствующих глубинах (H) на t и $1/\rho_н$ и получим ординаты Q_{xt}. Построив по ним эпюру распределения Q_{xt}, измерим планиметром площадь этой эпюры и определим таким образом искомый объем перемещения наносов.

8.13. Результаты изучения и расчета динамики прибрежных наносов могут быть использованы для составления морфодинамических карт-схем. Основное содержание этих карт – обозначение направления перемещения и мощности потока наносов, размаха миграции наносов. Кроме того, на карту наносятся равнодействующие волнового режима, получаемые по известным волно- или ветроэнергетическим методам, и преобладающее направление штормовых течений при разных направлениях ветра и т.д.

9. ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА ДНА ВОДОХРАНИЛИЩ

Производство промерных работ [1]

9.1. Изучение рельефа дна водохранилищ производится в основном промером глубин. Объем и точность измерений определяются задачами изысканий, характером рельефа дна и берегов.

Промер выполняется следующими средствами:

наметкой – в интервале глубин 0–5 м;

ручным лотом – в интервале глубин 0–20 м;

механическим лотом – в интервале глубин 0–40 м;

эхолотом – в интервале глубин, определяемом техническими данными прибора.

Выбор средств проведения промеров обусловливается технической оснащенностью, целью и задачами изысканий.

Ошибка в отсчитывании глубин зависит от конструкционных особенностей применяемого прибора и в общем случае не должна превышать в диапазонах глубин:

0–20 м – 0,1 м;
20–50 м – 0,2 м;
50–100 м – 0,5 м;
100 м – 1,0 м.

Критериями подробности промера являются: при промере наметкой, ручным и механическим лотом – расстояние между определениями места глубин на галсе и межгалсовые расстояния; при промере эхолотом – межгалсовые расстояния.

Определение места глубин производится при промере:

а) наметкой, ручным и механическим лотом – с интервалом не более 1 см в масштабе планшета. В приурезовой зоне и участках резкого изменения глубин количество определений удваивается;

б) эхолотом – по характерным глубинам (гребень подводного вала, бровка свала глубин и т.д.), но с интервалом не более 1 см в масштабе планшета.

В общем случае промерные точки должны находиться на таком расстоянии, при котором разница в измеренных глубинах на двух соседних точках не превышает величины сечения горизонталей принятых масштабов карт. Следовательно, чем положе профиль дна и мельче масштаб составляемых карт, тем меньше точек измерения глубин. Предельные расстояния между промерными точками по галсу на прибрежных отмелях с различными углами наклона указаны в табл. 21.

Таблица 21

Угол наклона отмели, град	Сечение горизонталей рельефа, м					
	0,5	1	2	5	10	20
2	14	29	57	143	287	573
3	10	19	38	95	191	382
5	6	11	23	57	114	229
8	4	7	14	36	71	142
10	3	6	11	28	57	113

В практике изысканий промерные точки вблизи берегов обычно располагаются на расстоянии 1, 5, 20, 50 м и более. Исходя из данных табл. 21 и учитывая данные практики и картографические требования, можно установить

[1] Плановая и высотная основа промера, проложение промерных галсов и определение места промера на галсе изложены в п п. 11.3–11.9.

расстояния между промерными точками, обеспечивающие необходимую детальность проводимых работ.

Расстояния между галсами в общем случае устанавливаются равными 1–2 см в масштабе планшета.

Запроектированная общая система покрытия района изысканий промерными галсами может быть локально сгущена: в связи со значимостью участка в проектной проработке; по мере выявления действительного характера рельефа подводного берегового склона и ложа водохранилища; для выяснения экспозиции и морфометрии отдельных форм рельефа (подводных валов, кос и т.п.).

В указанных случаях создаются частные планшеты сгущения общей системы покрытия.

Ориентирование промерных галсов в общей системе покрытия района изысканий производится:

а) нормально простиранию изобат или экспозиции береговой линии: у относительно прямолинейных берегов; на слабоизрезанных участках ложа водохранилища; на участках развития аккумулятивных форм рельефа;

б) под углом 45° к простиранию изобат или береговой линии: в районах сильнорасчлененного рельефа подводного берегового склона и ложа водохранилища; в приустьевых участках рек;

в) веерообразно: в районах развития рельефа, выраженного резко изогнутыми изобатами (мысы, малые острова и т.п.).

Угол между линиями галсов рассчитывается по формуле

$$\theta = 57{,}3\, m/S, \qquad (80)$$

где m – расстояние между галсами на внешнем крае исследуемого участка;
S – расстояние от полюса створных знаков до конца галса;

г) нормально к продольной оси: каналов, фарватеров; глубоко врезанных заливов водохранилища; линейно ориентированных понижений рельефа ложа водохранилища;

д) в произвольном направлении к простиранию изобат и береговой линии.

Контрольные галсы прокладываются с условием как минимум двухкратного пересечения каждого галса общей системы покрытия района изысканий. Расхождения между глубинами в точке пересечения основного и контрольного галсов не должны превышать двойной точности отсчитывания глубин.

9.2. Измерение глубин производится аппаратурой и с точностью, регламентируемой п. 9.1 настоящих Рекомендаций.

Промер наметкой осуществляется с гребной шлюпки или со шлюпки, движущейся с помощью мотора мощностью до 8 · 735,499 Вт (8 л.с.) при высоте волны не более 0,25 м. Наметка изготавливается из древесных материалов и размечается с оцифровкой через 0,1 м. Нуль наметки должен совпадать с подошвой металлического башмака, укрепляемого в нижней части и имеющего диаметр до 150 мм.

При работе наметкой в штиль глубины отсчитываются с точностью цены деления шкалы наметки. В условиях волнения глубины определяются как среднее арифметическое из глубин, измеренных при прохождении 3 гребней и 3 ложбин волн. При промере на участках, где дно сложено валунно-глыбовым, песчаным или гравийно-галечным материалом, диаметр башмака наметки должен составлять 40–60 мм. При промере на участках дна, сложенных алевритовым и илистым материалом, диаметр башмака должен составлять 100–120 мм. Определение места на галсе производится в момент измерения глубин.

Промер ручным лотом выполняется с гребных шлюпок или шлюпок с мотором мощностью до 8 · 735,499 (8 л.с.) при высоте волны до 0,25 м. Для повышения точности промера применяются стандартные 50-метровые лоты с проволочным (диаметр 1,5 мм) лотлинем, маркированным через 0,5 м.

Лотлинь компарируется перед началом и в конце работ ежедневно; сместившиеся более чем на 0,05 м марки исправляют и вводят соответст-

вующие поправки в результаты промеров. Данные проверки вносятся в таблицу журнала промера и используются для построения тарировочных графиков. Измерение глубины выполняется после как минимум двукратной фиксации касания пяткой лота дна и обтягивания слабины лотлиня.

Промер механическим лотом осуществляется с катеров или шлюпок при волне высотой не более 0,5 м. Комплект прибора включает лот с тросом, угломерную вилку, счетчик для определения длины вытравленного троса и лебедку. Широко используются гидрометрические лебедки ПИ-23, ПИ-24.

Счетчик лебедки тарируется ежедневно перед началом и в конце работы. Тарировка выполняется сравнением его показателей с длиной троса, измеренной 20-метровой мерной лентой или компарированной металлической рулеткой. В процессе промера при каждом подъеме груза необходимо счетчик лебедки устанавливать на нуль.

При выполнении промеров угломерная вилка устанавливается горизонтально. Отклонения троса от вертикали фиксируются при изменении угла более чем на единицу цены деления вилки, но не реже чем через 5 измеренных глубин.

Груз, чаще всего рыбовидной формы, весом 5–30 кг подвешивается на тросе с наклоном на хвост. При входе груза в воду перед началом работ измеряется начальный угол отклонения троса от вертикали – α_1, который при проведении промера не должен превышать 40^0. Определение места на галсе производится в момент снятия отсчетов с угломерной вилки и измерения длины вытравленного троса.

При расчете и определении места измеренной глубины поправка механического лота слагается из постоянной поправки за горизонтальное отставание груза и поправки за отклонение троса от вертикали. Поправка за горизонтальное отставание груза определяется как:

$$D = \chi \operatorname{tg}(\alpha/2) + d, \qquad (81)$$

где χ – глубина по счетчику, м; α – угол отклонения троса от вертикали при измерении глубины; d – расстояние от угломерной вилки до отводного блока лебедки, м.

Поправка за отклонение троса от вертикали определяется в зависимости от величин α и χ по табл. 3 в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам: вып. 7, ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 476 с.

Эхолотный промер осуществляется с изыскательских судов, катеров и шлюпок под лодочными моторами при бортовой качке до 10^0, килевой – до $1{,}5^0$. Рекомендуемые отечественные типы промерных эхолотов – ПЭЛ-2, ПЭЛ-3; возможно применение эхолотов типа "Кубань", ИРЭЛ, а для рекогносцировочных съемок – "Язь". Рекомендуемый иностранный эхолот – *mS* =26 фирмы "Кельвин-Хьяз" (Великобритания).

Промер эхолотами производится в интервале глубин, определяемом техническими данными прибора. Режим работы эхолота выбирается исходя из необходимости использования наиболее крупномасштабных диапазонов записи глубин. Переключение на мелкомасштабные обзорные диапазоны необходимо и допускается в следующих случаях:

а) в условиях резких колебаний глубин, при которых крупномасштабная непрерывная запись не может быть обеспечена;

б) при производстве контрольной записи, при включении и выключении эхолота, переключении фазы и т.п.

При выполнении промера оперативные отметки наносятся на эхограмму в момент определения места; при резком изменении глубин; изменении режима движения судна.

Основные требования, предъявляемые к эхограмме, – четкость и непрерывность записи нулевой линии и линии поверхности дна. Причины нарушения этих требований должны быть выяснены до дешифровки эхограммы и в необходимых случаях сомнительные участки следует проверить повторным промером.

Основные причины получения прерывистой записи и многократных отражений на эхограмме следующие:

а) неисправности и помехи электромеханического характера, а именно: загрязнение и окисление контактов, изменение скорости оборотов электромотора эхолота, изменение усиления;

б) гидрологические явления: волнение и температурные неоднородности в толще водной массы;

в) гидробиологические явления: скопление планктона, рыб, водорослей и т.п.;

г) отражения от сложных форм рельефа дна в пределах конуса излучения звука.

Причины искажения записей на эхограмме, указанные в п. "а", устраняются регулированием эхолота в порядке, предусмотренном прилагаемой к нему Инструкцией по эксплуатации.

Глубины, измеренные эхолотом, подлежат исправлению суммарной поправкой $\Delta z_э$, определяемой в процессе промера для всего диапазона измеренных глубин:

$$\Delta z_э = \Delta z_т + \Delta z_п + \Delta z_о.$$

Поправка $\Delta z_т$ определяется тарированием во всем диапазоне измеряемых глубин, но не более 60 м. Тарирование производится после регулировки числа оборотов электровигателя погружением в конусе излучения звука отражателя; отражатель погружается на мерном лине. Расхождение показаний эхолота и мерного линя не должно превышать точности отсчитывания глубин в соответствующем диапазоне.

Поправка $\Delta z_п$ вводится при отклонении скорости вращения электродвигателя эхолота при промере от таковой при тарировке.

Поправкой $\Delta z_о$ учитывается заглубление вибраторов эхолота на ходу судна по сравнению с таковым на стоянке при тарировке. Она определяется по шкале, наносимой у ватерлинии в районе расположения вибраторов.

Результаты промеров, полученные любым способом, подлежат также исправлению поправкой уровня $\Delta z_ƒ$, которая определяется как разность отметок теоретического нуля глубин (ТНГ) и истинного на момент промера. За ТНГ на водохранилищах принимается абсолютная отметка нормального подпорного уровня. Истинный уровень на момент выполнения промерных работ может быть определен следующим образом:

а) измерен в районе промера на временном уровенном посту;

б) принят равным уровню на постоянном посту ГКС СССР в зоне его репрезентативности.

Выборка глубин для нанесения на планшет с эхограмм выполняется по элементам рельефа дна и оперативным отметкам определения места на галсе, но не реже чем это указано в п. 9.1. Снятие выбранных и исправленных глубин с эхограммы производится специальным прибором или палеткой, позволяющей механически учитывать поправки глубин.

9.3. Способом высокоточного определения местоположения глубин является промер со льда.

Промерные работы выполняются ручным лотом или эхолотом отдельными галсами и равномерным покрытием точками заданной площади. Во всех случаях проектируются контрольные галсы.

При планировании равномерного покрытия района изысканий точками промера разбивка производится от двух взаимно перпендикулярных магистралей, служащих для построения сети основных квадратов (прямоугольников), в пределах которых разбивается сеть более мелких квадратов; на сторонах последних строится система галсов. Провешивание сторон квадратов и галсов осуществляется теодолитом. Длина стороны квадрата (минимального) регламентируется масштабом промерного планшета и в общем случае должна удовлетворять требованиям п. 9.1. Схема разбивки наносится на рабочий планшет промера.

В ходе промера ведется ежедневный контроль неподвижности ледяного поля. С этой целью на мористой стороне основного квадрата устанавливается веха, положение которой систематически определяется относительно произвольно выбранной точки двумя теодолитами.

При смещении вехи на 0,2 мм в масштабе планшета положение магистралей определяется заново.

Промер со льда лотом производится через лунки, подготовленные пашней, ручным буром или мотобуром; оптимальный раствор пера буров 150°.

Промер через лед эхолотом производится приборами, имеющими вибраторы из керамического титана бария с частотой излучения 22–400 кГц. Промер выполняется на льду, имеющем однородную кристаллическую структуру, на глубинах не менее 2 м при отсутствии внутриводного однородного льда. Для принятия решения о возможности такого промера предварительно исследуется структура льда в нескольких характерных точках участка.

Акустический контакт между вибраторами и льдом достигается образованием водяной пленки под вибратором, что может быть достигнуто подтаиванием льда нагревательной аппаратурой или подливом 0,2–0,25 л воды под вибраторы.

Обработка и интерпретация результатов промерных работ

9.4. Нанесение промерных точек на планшет осуществляется следующими методами:

а) по координатам точек – при определении места прямой засечкой;

б) по предварительно нанесенной на рабочий планшет сетке лучей (дирекционных углов) и дуг вмещающих окружностей непосредственно во время промера с корректировкой на отчетном планшете – при определении места комбинированной засечкой;

в) протрактором ПРМ – при определении места обратной засечкой;

г) по сеткам изолиний – при определении места фазовыми и импульсными РНС.

Контроль точности прокладки определений места производится прокладкой вторично каждого десятого определения. Расхождения в плановом положении точек при контроле не должны превышать 2,0 мм.

Места глубин, определенных лотом или наметкой, разносятся согласно прокладке, выполненной на отчетном планшете.

Места глубин, зафиксированных эхолотным промером, отыскиваются на эхограмме по расчету между оперативными отметками, соответствующими моменту определения места. Перенос глубин с эхограмм на отчетные планшеты выполняется интерполяционной палеткой.

Перенос глубин с частных планшетов сгущения общей системы покрытия, выполняемого в соответствии с п. 9.1, производится пантографом или пропорциональным циркулем.

9.5. Изобаты на планшетах наносятся с постоянной высотой сечения методом линейной интерполяции между глубинами. При проведении изобат необходимо учитывать особенности генезиса рельефа данного района.

9.6. Морфометрическая интерпретация результатов однократного промера включает расчет и установление: направления и величины уклонов дна с некоторой заданной периодичностью; границ, абсолютных и относительных превышений форм рельефа любого генезиса.

Морфометрическая интерпретация результатов повторного промера проводится с целью исследования характера, тенденций и объема деформаций рельефа. При этом обработка результатов может быть выполнена следующими методами:

а) совмещением батиметрических карт (планшетов промера);

б) методом батиграфических кривых;

в) совмещением поперечников;

г) методом призм.

Метод совмещения планшетов промера применяется для анализа пространственных деформаций рельефа дна. Сущность метода заключается в совмещении планшетов района, ограниченного заданными в прямоугольной системе координатами, в пределах которого с некоторым интервалом

времени был выполнен повторный промер. Этим достигается возможность расчета общего или локального расширения (сокращения) площади диапазона глубин, соответствующего выбранному при проведении изобат сечению рельефа.

Метод совмещенных поперечников применяется для количественного анализа деформаций рельефа дна. Сущность метода заключается в подсчете площадей размыва и аккумуляции по результатам совмещения профилей последовательных съемок рельефа. Объем деформаций вычисляется как произведение полусуммы площадей размыва и аккумуляции на смежных профилях (по всему профилю или его отрезку) на расстояние между ними.

При построении батиграфических кривых исходным аргументом служит распределение глубин на фиксированном в пространстве участке подводного берегового склона или ложа водохранилища. Построение кривых производится по результатам серии промерных работ. В начале на планшете исходного промера вычисляются площади между изобатами, проведенными через постоянное сечение. Затем аналогично определяются площади на планшете последующего промера. Имея в виду возможные деформации контурных линий (уреза, исходной изобаты), подсчет площадей производится от произвольной линии, имеющей неизменное положение в системе прямоугольных координат планшета промера, или в процентах от общей площади первого промера. Проценты площадей в диапазонах глубин, соответствующих сечению рельефа, переводятся в абсолютные значения площадей. Последние наносятся на график нарастающим итогом. Ось ординат графика – диапазоны глубин, а ось абсцисс – абсолютные значения площадей.

Выполненное таким путем графическое интегрирование позволяет определить абсолютные значения объемных характеристик деформаций рельефа при произвольном проложении промерных галсов.

Метод призм является методом количественной оценки пространственно-временных деформаций рельефа подводного берегового склона и склонов изолированных (уединенных) положительных и отрицательных форм рельефа ложа водохранилища и включает в себя основные элементы выше рассмотренных методов без усложнения схем расчета.

Сущность этого метода заключается в расчленении подводного берегового склона (склона уединенной формы рельефа ложа) равноудаленными секущими плоскостями на серию призм (рис. 10). Объем сегмента водного сечения склона определяется по уравнению:

$$q = L S\left[1/2\left(\sum_{1}^{m-1} H_m - \sum_{1}^{m-1} H_1\right) + \sum_{1}^{m-1} H_1 + \ldots + \sum_{1}^{m-1} H_{m-1}\right] + \sum_{1}^{m-1} H_1 L_1 S/2 + \left(\sum_{1}^{m-1} H_m + \sum_{1}^{m-1} H_{m-1}\right) L_2 S/2, \quad (82)$$

где L, S – длина сторон прямоугольников, м; H_m – глубины по линиям 1 – m, м; L_1 – среднее расстояние до уреза, м; L_2 – среднее расстояние до расчетной глубины, м; m – количество точек на линии.

Объем деформаций рельефа за период между съемками находим по уравнению

$$Q = q_1 - q_2. \quad (83)$$

Счисление глубин при несоответствии пространственного положения профилей ведется по параллельным разрезам, задаваемым с любым шагом X. При этом ориентирование поперечников выполняется относительно координатной сетки промерного планшета. Очевидно, что возможность произвольного изменения шага при расчленении водного сечения склона на серию призм позволяет графически и аналитически представить структуру деформаций дна (баланс наносов), локализовать ее пространственные изменения. При большом объеме выполненных работ алгоритм принципиальной схемы расчета пространственной структуры баланса наносов легко реализуется на ЭВМ любого типа.

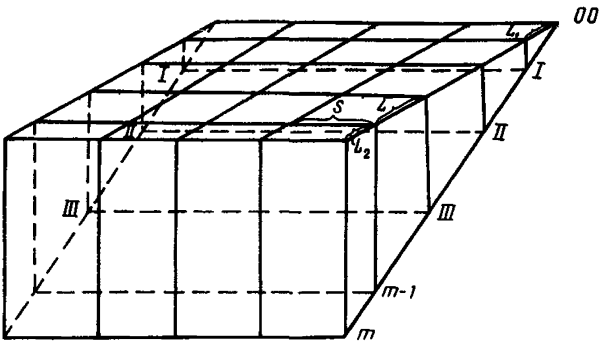


Рис. 10. Схема расчленения подводного берегового склона на серию призм

10. ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ

Общие задачи и пути их решения

10.1. На берегах и в прибрежной зоне водохранилищ развиваются разнообразные, связанные между собой процессы, которые вызывают изменение свойств слагающих берега пород, разрушение, перемещение и отложение материала этих пород как в поперечном, так и в продольном направлениях в надводной и подводной частях берегового склона. К этим процессам относятся волновая, ледовая и термическая абразия, русловая и склоновая эрозия, дефляция, физическое выветривание, гравитационные движения пород и некоторые другие процессы.

10.2. При проектировании берегоукреплений и сооружений иного назначения на берегах, прибрежной территории или акватории возникает необходимость в оценке и прогнозе развития этих берегоформирующих процессов.

Предварительный анализ имеющихся материалов в совокупности с рекогносцировочным обследованием, как правило, позволяет с большой уверенностью установить, какие из берегоформирующих процессов действуют на данном конкретном участке, какие из них являются ведущими в формировании берегов и могут представлять опасность для берегов и существующих сооружений или осложнять строительство и эксплуатацию проектируемого сооружения.

Следующая задача заключается в оценке степени этой опасности и необходимости принятия специальных мер по ослаблению или полному исключению развития того или иного берегоформирующего процесса.

Решение этой задачи в большинстве случаев требует проведения полевых изысканий. Такие изыскания должны быть направлены на получение сведений, характеризующих как результаты деятельности изучаемых процессов, так и обстановку, в которой они происходят. Это дает возможность оценить современное состояние берега, характер, а в отдельных случаях и темпы развития берегоформирующих процессов, получить исходные данные для прогноза действия этих процессов и для проектирования в случаях необходимости защитных мероприятий.

Целесообразно еще до проведения полевых изысканий осуществлять ориентировочный прогноз деформации берега, что способствует более целенаправленному выполнению изыскательских работ. В процессе изысканий должен быть получен полный набор данных, необходимых для последующего уточнения прогноза в зависимости от принятой методики прогноза.

10.3. В настоящее время имеется уже значительное количество методов, отдельных приемов и расчетных формул, предложенных для оценки и предсказания хода развития основных берегоформирующих процессов. В данных Рекомендациях освещаются возможности оценки и прогноза лишь размыва берегов, тесно связанного с гидрометеорологическим режимом водохранилища.

10.4. Ветроволновая абразия берегов (ВВАБ) во многих случаях играет определяющую роль в динамике берегов, особенно в первые годы после наполнения водохранилища. В результате ВВАБ происходит полное разрушение и унос материала берегообрушений за пределы первоначального местонахождения, что приводит к коренной перестройке береговых склонов, к активизации других разрушающих берега процессов.

Точность прогноза ВВАБ зависит как от использованного метода прогноза, так и от полноты сбора исходных данных. В условиях существующих водохранилищ есть благоприятная возможность корректировки вводимых в прогноз данных и повышения за счет этого точности прогноза.

Широкое применение на практике получили методы прогноза, разработанные Е.Г.Качугиным и Г.С.Золотаревым. Они рассчитаны на использование как в условиях проектируемых, так и тем более существующих водохранилищ.

10.5. Наиболее простым по выполнению является метод прогноза, предложенный Г.С.Золотаревым. В основном задача здесь сводится к построению прогнозного профиля берега по заданным тем или иным способом его элементам в зависимости от срока прогноза, геолого-литологического строения берега, максимальной высоты волн и горизонтов сработки уровня воды в водохранилище. Метод основан на представлении о постепенном затухании абразии, выполаживании поперечного профиля прибрежной отмели.

Точность прогноза по этому методу в наибольшей степени зависит от удачного выбора уклона поверхности отмели. В современном виде данный метод предполагает зависимости уклонов отмели только от времени и состава породы, в которой вырабатывается отмель. В действительности на уклоны отмели влияют также и другие элементы природной обстановки: размеры, продолжительность действия и мощность ветровых волн, уровенный режим водоема, форма и размеры берега, конфигурация береговой линии, размываемость пород. В методе содержатся и другие существенные недостатки, что весьма сужает область его применения.

Указанный метод дает возможность прогнозировать на два срока: на 10 лет и на так называемую "конечную стадию" (последний срок не определен). В практике изысканий этот метод применяется и при прогнозе на другие, не предусмотренные автором сроки путем корректировки величин углов наклона отмели по фактическим данным водохранилища, взятом в качестве аналога.

Применение метода Г.С.Золотарева может дать наименьшую погрешность (хотя и не гарантирует от грубых ошибок) в условиях глубоководных зон водохранилищ при незначительном колебании уровня воды, сложении берегов связными и еще более прочными породами, слабо развитом потоке наносов.

10.6. Метод Е.Г.Качугина более обоснован и позволяет выполнять прогноз ВВАБ на любой срок с момента заполнения водохранилища. Основная формула, предназначенная для расчета среднего объема размыва берега, учитывает главный гидродинамический фактор ВВАБ – ветровое волнение и важнейшие условия – размываемость пород и высоту берега. Данная формула правильно отражает общую тенденцию затухания ВВАБ и теоретическую бесконечность этого процесса.

Тем не менее метод не свободен от противоречий и содержит ряд допущений, сужающих область его применения. Метод Е.Г.Качугина наиболее приемлем для прогноза ветроволновой абразии невысоких берегов, сложенных рыхлыми и связными породами, при прямолинейной береговой черте и близкой к горизонтальной поверхности побережья в направлении в глубь

территории в условиях незначительного колебания уровня воды в водохранилище в безледное время.

10.7. В последнее время разработан метод прогноза ветроволновой абразии берегов, который более полно учитывает факторы и условия, определяющие развитие этого процесса. В прил. 3 приведено подробное его освещение. Этот метод также содержит ряд условных допущений, что отражается на точности расчетов. Тем не менее в отличие от других методов он учитывает влияние конфигурации береговой линии и ее изменение во времени. Здесь принимаются во внимание колебания уровня воды в водоеме, влияние их на энергию волн и абразионную эффективность волнения. При применении данного метода не возникает трудностей учета формы и высоты берега, так как это учитывается само собой при построении прогнозного профиля и вследствие ввода в расчет ширины прибрежной отмели. Расчет исходных элементов волн производится в соответствии с рекомендациями главы СНиП по нагрузкам и воздействиям на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), а при вычислении волноэнергетических характеристик оценивается энергия всей гаммы волн, возникающей при той или иной скорости и различных направлениях ветра. Прогноз можно производить как для проектируемых так и для существующих водохранилищ.

Рассматриваемый метод применим в любых зонах водохранилищ с различным уровенным режимом для берегов любой высоты и формы профиля, а также конфигурации в плане при сложении их несвязными и связными породами.

10.8. При наличии за предшествующий период фактических данных о размыве берега, для которого составляется прогноз, можно использовать метод прямой экстраполяции. Но к применению его необходимо подходить с большой осторожностью ввиду значительного колебания по годам ветроволнового и уровенного режимов, в особенности на водохранилищах с многолетним регулированием стока. Существенным изменением могут подвергаться и другие влияющие на ВВАБ условия. Так, при отступании берега происходит обычно изменение его высоты, возможна при этом также резкая смена пород.

10.9. Прогнозные расчеты интенсивности русловой боковой эрозии могут быть произведены согласно Рекомендациям по учету естественных циклических деформаций русел равнинных рек при строительном проектировании (Л.: Гидрометеоиздат, 1969). В этой работе в зависимости от типа руслового процесса предлагаются те или иные способы прогноза размыва берегов. Количественные измерители руслового процесса определяются по натурным данным (в основном, по совмещенным планам русла за предшествующий период), по аналогам или расчетным путем. Эти измерители относятся к одному морфологическому элементу или являются осредненными для группы однородных элементов.

Упомянутая методика наиболее пригодна для расчетов в самых верхних районах верховьев водохранилищ, где стоковые течения оказывают определяющее влияние на берега.

10.10. Для оценки влияния стоковых течений на ВВАБ в условиях подпертого нижнего бьефа гидроузла, являющегося верховьем нижеследующего водохранилища, предлагаются следующие рекомендации.

Как известно, скорость стоковых течений в целом ослабевает вниз по водохранилищу. По характеру гидрологического режима, степени активности стоковых течений подпертый нижний бьеф может быть разделен на три района (участка): верхний, средний и нижний[1].

В верхнем районе размыв берега происходит в основном за счет воздействия стоковых течений. Если необходимо в этих условиях произвести прогноз ВВАБ, то расчет по методике, приведенной в прил. 3, следует выполнять, предполагая отсутствие аккумуляции наносов на свале отмели и затухание размыва берега. Ширина прибрежной отмели по горизонтали ($l_в$ и

---

[1] Иконников Л.Б. Гидрологическое районирование нижних бьефов гидроузлов для оценки и прогноза размыва берегов. – В сб.: Инж. изыскания в стр-ве. Исследования геодинамических процессов. ЦИНИС, 1977, вып. 7 (60), с. 10–13.

l_c) принимается на любой прогнозный срок равной ее значениям, снятым с самого позднего из фактических профилей, или средним значениям за предшествующий период (при многократных измерениях). Верхний предел размыва следует определять при максимальном из частых уровне воды.

В условиях среднего района при расположении берега вблизи затопленного основного русла реки, где существует заметное стоковое течение, коэффициент K_a принимается равным нулю. В остальном прогноз ВВАБ производится так же, как и в отсутствии стокового течения.

Особенность прогноза ВВАБ в нижнем районе, при расположении берега в непосредственной близости к затопленному основному руслу реки, заключается лишь в некоторой корректировке коэффициента K_a, вычисляемого по одной из формул (130) – (132), в сторону его уменьшения. С этой целью в указанные формулы вводится отношение удаленности берега от нижней границы среднего района к длине нижнего района S_y/S .

Для среднего и нижнего районов водохранилищ недельного и сезонного регулирования верхний предел размыва находится так же, как и для зон глубокого подпора: при краткосрочном прогнозе с учетом среднего из частых уровня воды, а при долгосрочном прогнозе – с учетом максимального из частых уровня воды.

Возможность образования береговых аккумулятивных форм, т.е. развития берега по аккумулятивному пути в верховьях водохранилищ должна оцениваться с учетом типа руслового процесса по методике ГГИ[1], конфигурации всего русла в плане в районе изучаемого берега.

Рекомендации по изысканиям для оценки и прогноза динамики берегов

10.11. Методика различных видов изысканий на акватории и на берегах водохранилищ освещается в других разделах. В данном разделе основное внимание уделяется составу и некоторым особенностям изысканий для решения задачи оценки и прогноза размыва берегов под воздействием ветровых волн и стоковых течений.

Для установления количественных показателей размыва берега на том или ином участке необходимы наблюдения по крайней мере в течение нескольких лет, предшествующих строительству, что практически неосуществимо при современном производстве изысканий в сжатые сроки. Для выполнения этих работ могут быть привлечены научные и производственные организации, ведущие региональное изучение берегоформирующих процессов на водохранилищах. Постановка длительных стационарных наблюдений целесообразна в настоящее время в местах перспективного строительства. На основании таких наблюдений может быть дан наиболее надежный прогноз размыва берегов.

10.12. Инженерные изыскания под конкретные объекты в береговой зоне должны быть прежде всего направлены на освещение рельефа побережья и прибрежной части вдоема как путем площадной съемки, так и путем измерений отдельных поперечных профилей.

Протяженность изучаемого участка зависит от поставленных задач, но не должна быть менее 1 км. Ширина снимаемой полосы побережья зависит от срока, на который необходим прогноз размыва берега, и предполагаемой интенсивности размыва берега.

Особенно тщательно следует изучать зоны существующих и возможных деформаций в надводной и подводной частях берегового склона с выделением всех элементов поперечного профиля. Измерения с этой целью производятся по поперечникам, размещенным в характерных местах побережья на расстоянии не более 250 м друг от друга. Наиболее высокая точность регистрации рельефа необходима для правильной оценки характера и тенденции развития медленно протекающих деформаций берегов и дна. Сроки

---

1 Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод / Госкомгидромет. – М.: Стройиздат, 1981. – 224 с.

повторных измерений поперечных профилей следует выбрать с таким расчетом, чтобы была возможность оценить динамику рельефа в периоды наиболее активных ее проявлений (после зимней сработки воды из вышележащего водохранилища, после прохождения максимальных сбросов воды через гидроузел, после сильных и продолжительных штормов и т.д.).

В результате площадной съемки данного участка (в масштабе не мельче 1:2000) необходимо получить как минимум очертания бровки и основания берегового обрыва или линии уреза воды. Съемка необходима для правильного учета конфигурации береговой линии в расчетах энергии ветрового волнения и для установления общей направленности развития берега.

В верховьях водохранилищ желательно освещение рельефа в пределах всего русла на протяжении, как правило, нескольких километров с составлением плана рельефа в горизонталях в масштабе 1:5000 – 1:10000.

Для получения поперечных профилей береговых склонов можно применять нивелирование и тахеометрию, а в условиях крутых склонов небольшого протяжения, кроме того, вaтерпасовку. Промеры глубин по поперечным к линии берега створам должны быть наиболее детальными в пределах прибрежной отмели (бечевника), включая ее свал.

В отдельных случаях, когда имеются материалы разновременных съемок рельефа, открывается возможность оценить динамику рельефа за период между съемками и провести эпигнозные расчеты по выбранной методике прогноза размыва берега с целью ее проверки и уточнения исходных данных для прогноза.

10.13. Вторая задача при производстве изысканий заключается в выяснении геолого-литологического строения берегов и отмели (бечевника).

Особый интерес при этом представляет изучение строения прибрежной отмели, так как оно дает возможность установить ширину абразионной части отмели, а следовательно, и общую величину отступания берега, приближенно оценить объем размыва берега с момента заполнения водохранилища. Полученные данные о размыве берега могут быть использованы для уточнения коэффициентов размываемости пород при прогнозе ВВАБ. Изучение отмели осуществляется путем закладки траншей или зонированием. Наиболее благоприятен для этого период предполоводной сработки водохранилища, перед самым окончанием ледостава, когда отмель осушается и освобождается ото льда.

Для важнейших литологических разностей пород, слагающих берег, и прибрежных отложений необходимо исследование их свойств, учитываемых так или иначе при прогнозе размыва берегов. Прежде всего должны быть охарактеризованы следующие свойства: гранулометрический состав (с обязательным выделением фракции более 0,5 мм и менее 0,05 мм), плотность скелета и минеральной части грунта, влажность, угол естественного откоса под и над водой (для несвязного материала). Количество таких определений должно быть достаточным для получения средних показателей свойств отдельно для пляжа, аккумулятивной части отмели и пород на берегах. Особое внимание при этом должно быть уделено изучению пород, залегающих в нижней части берега.

В связи с необходимостью изучения пород не только в пределах существующего берега, но и в глубь побережья на ширину зоны возможного размыва требуется выполнение ручного или колонкового бурения с проходкой скважинами пород до отметки нижнего предела размыва берега. Плотность пород в этом случае определяется методом динамического зондирования.

10.14. В состав гидрометеорологических изысканий в условиях существующих водохранилищ следует включать водомерные и ветроволномерные наблюдения, измерения стокового течения.

Организация временного ветроволномерного поста желательна при проектировании важных строительных объектов. Наблюдения должны дать материал для проверки и уточнения расчетных параметров ветровых волн на краю прибрежной отмели при различных скоростях и направлениях ветра и различных уровнях воды в водоеме.

В верховьях водохранилищ в пределах изучаемого участка необходимо проведение нескольких серий измерений направления и скорости стокового течения при характерных режимах работы гидроузлов и при характер-

ных уровнях воды в водохранилище. Такими измерениями должна быть охвачена прибрежная зона вдоль всего изучаемого участка побережья.

При изысканиях в верховьях водохранилища, особенно при расположении его в каскаде, как правило, бывает необходима организация временного водомерного поста. Это вызвано повышенной неустойчивостью уровня воды, редкой сетью постоянно действующих водомерных постов или недостаточной частотой наблюдений на них.

Следует также уделить внимание сбору сведений о воздействии на берега льда при его подвижках. В связи с этим весьма полезно проведение специальных обследований изучаемого участка перед вскрытием водохранилища от ледового покрова.

10.15. В последнее время практиковалось непосредственное изучение сопротивляемости пород размыву с помощью струи воды постоянного напора. При всей условности таких опытов они все же дают результаты, которые вполне приемлемы для относительной (сравнительной) оценки несвязных и связных пород, находящихся в ненарушенном состоянии, по их способности к размыву, что представляет интерес при прогнозе размыва берегов. Оценка сопротивляемости размыву пород в данном случае производится непосредственно на месте их залегания и к тому же в очень короткий срок, что является большим преимуществом этого способа.

При постановке таких опытов размыв пород лучше всего производить с расстояния 1,5–2,0 м при давлении поступающей в шланг струи воды $196 \cdot 10^3 - 245 \cdot 10^3$ Па (2–2,5 кгс/см^2). Для получения компактной струи следует использовать пожарный брандспойт с внутренним диаметром на выходе 16 мм. Продолжительность одного опыта не должна превышать: для песков – 5–10 с, для супесей и легких суглинков – 10–20 с, для тяжелых суглинков и глин – 30–50 с.

Сопротивляемость пород размыву в результате этих опытов определяется путем деления энергии струи на объем размытой породы:

$$\varepsilon = E/Q, \tag{84}$$

где E – количество энергии, затраченной на размыв породы, Дж (кгс·м);
Q – объем размытой породы, м^3.

В процессе размыва песчано-глинистых отложений, как правило, формируется четкая ниша в виде усеченного конуса, объем которой легко определяется геометрическим способом. Если ниша размыва имеет неправильную форму и небольшой объем, измерение объема лучше производить путем заполнения инородным материалом.

Энергия струи на выходе из брандспойта вычисляется по формуле

$$E = \rho_в \mu w t \sqrt{2g^3 H^3}, \tag{85}$$

где $\rho_в = 1000$ кг/м^3 – плотность воды; μ – коэффициент расхода воды, равный для конически сходящихся насадок 0,95; w – площадь поперечного сечения насадки, м^2; $g = 9{,}81$ м/с^2 – ускорение силы тяжести; H – высота, соответствующая напору жидкости, м; t – продолжительность размыва, с.

Количество опытов для получения надежных средних значений размываемости породы, подвергаемой испытанию, зависит от степени ее однородности, а также качества опытов, особенно от точности замера ниш размыва. Для однородных пород достаточно проведения 3–5 опытов.

11. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Назначение и виды геодезических работ

11.1 Для обеспечения гидрологических изысканий на водохранилищах возникает необходимость в геодезических работах. Сюда относятся: создание планово-высотной геодезической основы для съемки побережья и акватории водохранилища, топографическая съемка побережья, координирование промера глубин и других гидрологических измерений, нивелирование уровней воды, высотная привязка водомерных постов и др.

Геодезическое обеспечение гидрологических изысканий производится в строгом соответствии с требованиями общесоюзных нормативных документов Главного управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК) и Госстроя СССР. При этом все работы по созданию геодезической основы и топографическим съемкам требуют согласования с территориальными органами Госгеонадзора ГУГК или органами местных Советов народных депутатов.

Для получения архивных материалов по картографо-геодезической изученности водохранилища следует обратиться в центральный картгеофонд ГУГК и территориальные инспекции Госгеонадзора, в проектно-изыскательские организации, выполнявшие ранее работы в районе предполагаемого строительства, а также в исполкомы местных Советов народных депутатов и Бассейновые управления речных путей МРФ.

Геодезические инструменты и приборы

11.2. Для выполнения указанных в п. 11.1 геодезических работ применяются теодолиты средней и технической точности, нивелиры всех классов точности, приборы для тахеометрической съемки и измерения расстояний.

Сведения по технической характеристике и описанию геодезических инструментов можно найти, например, в справочнике[1].

Особое место при выполнении отдельных видов геодезических работ занимают современные модели геодезических инструментов. Так, для измерения превышений геометрическим нивелированием следует отдать предпочтение нивелирам с самоустанавливающейся линией визирования, использование которых позволяет существенно повысить производительность труда.

Отсутствие препятствий для видимости на большие расстояния между береговыми пунктами создает благоприятные условия для широкого использования современных геодезических методов и приборов. Сюда относится свето- и радиодальномерная полигонометрия как основное средство создания плановой основы для съемочных и разбивочных работ. При координировании промерных и других гидрологических работ с помощью радиотехнических средств предпочтительнее использовать комплект радиоизмерительной аппаратуры "Изыскатель-2", разработанный в варианте "Радиомензула" Новосибирским институтом инженеров водного транспорта.

Сведения по технической характеристике свето- и радиодальномеров, методике их использования при положении полигонометрических ходов освещены в справочнике[1].

Плановое и высотное обоснование гидрологических работ

11.3. Плановая основа создается для обеспечения съемочных работ в масштабах 1:500 – 1:10000. Сюда относятся пункты государственной геодезической сети СССР и съемочного обоснования.

Средняя квадратическая ошибка определения пунктов планового обоснования относительно исходных пунктов не должна превышать для

---

[1] Справочник геодезиста: кн. 1, 2. – М.: Недра, 1975. – 1055 с.

аналитических сетей 0,1 мм, а для съемочных сетей – 0,2 мм в масштабе съемки.

Аналитические сети развиваются методом триангуляции в открытой местности или методом полигонометрии – в закрытой.

Пункты съемочного обоснования определяются аналитическими и графическими способами, проложением теодолитных ходов, а также фотограмметрическим путем.

11.4. Исходной основой для создания высотного обоснования промера глубин и съемки в масштабах 1:500 – 1:10000 являются марки и реперы государственных нивелировок I–1У классов, а также реперы уровенных постов с отметками в Балтийской системе высот.

При создании высотной геодезической основы в районе водохранилищ возможности применения геометрического нивелирования из-за условий местности нередко весьма ограничены. Экономически наиболее выгодно применять тригонометрическое нивелирование. Однако этот вид нивелирования как метод создания высотного обоснования вследствие влияния земной рефракции обычно не обеспечивает достаточную точность. В прил. 2 даны рекомендации по учету рефракции для практического решения этой задачи.

Проложение промерных галсов

11.5. Эта операция обычно осуществляется по компасу, по створным знакам или по направлению, указываемому с берега.

Проложение галсов по компасу выполняется ведением судна запроектированным курсом с корректировкой его по определениям места различными способами, рассматриваемыми в пп. 11.6–11.9.

Проложение промерных галсов по створным знакам (щиты или вехи) является одним из основных способов, применяемых при прибрежном промере глубин.

Расчет элементов створа выполняется для разрешающей способности глаза, равной 2 .

Расчет линейной чувствительности створа W , т.е. величины, на которую может сместиться судно перпендикулярно створу при визуально сохраняющейся створности знаков, производится по формуле

$$W = 0{,}582\, D(1 + D/a) \text{ м}, \qquad (86)$$

где D – расстояние от переднего створного знака до наблюдателя, км; a – расстояние между створными знаками, м.

Расстояние a между створными знаками определяется из уравнения

$$a = D^2/(1{,}72\, W - D), \text{ м}. \qquad (87)$$

Наибольшая длина галса D, на которой линейная величина смещения судна не превышает заданной величины W , рассчитывается по формуле

$$D = (1{,}31\sqrt{Wa} - a/2), \text{ км}. \qquad (88)$$

Проложение галсов по направлению, указываемому с берега, выполняется теодолитом, визирная ось которого совмещена с заданным курсом судна.

Судно удерживается на галсе корректировкой курса по радио или флажковыми сигналами.

Координирование точек гидрологических измерений

11.6. Средняя квадратическая ошибка определения места не должна превышать 1,5 мм в масштабе отчетного плана без учета графической ошибки прокладки.

11.7. Для определения местоположения судна в прибрежной полосе при удалении от берега на расстояние не более удвоенной длины D, вычисляемой по формуле (88), широко применяются визуальные методы. В этом случае задача решается посредством прямой угловой засечки с берега двумя угломерными инструментами или путем обратной угловой засечки с судна двумя секстанами, а при движении по створу засечки выполняются одним секстаном с судна или одним угломерным инструментом с берега. При обратной засечке количество береговых ориентиров должно быть равно четырем или трем при одном общем для обоих секстанов.

11.8. При измерениях в непосредственной близости от берега (до 100–200 м) определение места на галсе можно производить по размеченному через 1 м тросу, укрепленному на поплавках. Вытравливание троса производится с берега или с судна.

11.9. Использование радиотехнических способов наиболее целесообразно при выполнении гидрологических измерений в открытой части водоема в удалении от берега. Определение координат осуществляется линейной засечкой с берега. Для измерения расстояния используется радиотехническая система "Речной лаг – 2", разработанная Центральным проектно-конструкторским бюро МРФ РСФСР. Она состоит из задающей и двух отражающих станций, автопрокладчика, источников питания и антенн.

Система работает в варианте радиолага.

При производстве промера задающая станция с автопрокладчиком курса устанавливается на промерном катере, а отражающие станции – на берегу, в точках, координаты которых известны. Начальное положение судна определяют с помощью прямой или обратной угловой засечки. По мере удаления судна относительно начального положения радиоизмерительная система определяет приращение расстояний, а пройденный путь посредством автопрокладчика наносится на рабочий план в одном из заданных масштабов (1:2000, 1:5000 или 1·10000). Радиус действия системы составляет 5–6,5 км. Точность определения места 5–6 м. Она зависит от геометрии засечки: пересечение линий положения при определяемой точке не должно выходить за пределы 20–160°. Это создает определенные трудности в размещении береговых станций, требует неоднократной перестановки их в процессе съемки.

Указанного недостатка можно избежать, если для определения места воспользоваться полярным методом (по углу, измеренному с берега, и расстоянию). В таком варианте Новосибирским институтом инженеров водного транспорта разработана аппаратура для измерения расстояний "Изыскатель-2". Она состоит из задающей и отражающей станций. Первую размещают на промерном катере, а вторую на берегу в точке с известными координатами, что в совокупности образует систему "Радиомензула". Масса задающей станции 6 кг, отражающей – 3,5 кг. Радиус действия аппаратуры 2,5–3 км*.

При промере наблюдатель на берегу отмечает по команде с судна направление на плане, вдоль которого откладывает переданные по радиотелефону расстояния. Таким образом, ведется прокладка промера. Одновременно с регистрацией показаний счетчика, указывающего расстояния между задающей и отражающей станциями, отмечают глубины на ленте эхолота путем нанесения оперативной отметки. При движении судна на галсе (вдоль промерного профиля) рулевой ориентируется по показаниям счетчика расстояний, что позволяет выдерживать заданную подробность промера.

Испытания комплекса "Радиомензула" в полевых условиях показали, что определение места оценивается с погрешностью 0,5 м.

---

* Ганьшин В.Н., Буденков Н.А. Геодезические работы на речных и озерных изысканиях. – М.: Недра, 1979. – 159 с.

12. ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

12.1. Крупные и все увеличивающиеся масштабы строительства требуют ускоренных темпов изысканий и возрастающей надежности получаемых данных. Решение таковой задачи в ряде случаев значительно облегчается при широком использовании материалов аэрофотосъемки, что дает возможность, в частности, осуществлять более рациональное планирование конкретных участков и объемов предварительных, а затем и основных изысканий и на этой основе увеличить необходимую детальность получаемых результатов. При этом можно на любой стадии неоднократно обращаться непосредственно к просмотру и анализу аэрофотоснимков с целью проверки надежности получаемых данных и выводов.

Анализ и сравнение повторных аэрофотоснимков позволяют, кроме того, выявить и документально зафиксировать характер и последовательность развития геодинамических и гидрологических процессов в береговой и прибрежной зонах водохранилища и, что особенно важно, изучать гидрологические процессы (ветровое волнение, течения, перемещение наносов, ледовую обстановку) в открытой части водоема.

Краткие сведения об аэрофотоснимках и их свойствах

12.2. Изображение на аэрофотоснимках строится по принципу центральной проекции,которой свойственна передача на фотоизображении всех находящихся на местности объектов с присущими им в натуре линейными и угловыми соотношениями, а также размерами и очертаниями с учетом масштаба снимков. Масштаб определяется из отношения фокусного расстояния f, аэрофотоаппарата (АФА) к высоте самолета H в момент съемки кадра, т.е.

$$1/M = f/H. \qquad (89)$$

Из сказанного вытекает, что определение по снимкам угловых положений, линейных размеров и формы всех природных образований земной поверхности, а также измерение плановых расстояний между ними и вычисление площадей интересующих контуров. Это имеет первостепенное значение для всех видов картирования, которое является главным результатом завершающего этапа любых видов изысканий.

12.3. Достаточная точность передачи на аэрофотоснимках линейных размеров, форм и площадей изображенных объектов местности сохраняется лишь в центральной части снимков, ограниченной прямоугольником со сторонами в 8–9 см, при стандартном размере снимка 18х18 см. За его пределами появляются и к краям прогрессивно возрастают искажения форм и линейных величин природных образований особенно в условиях пересеченной местности.

При необходимости точных измерений и определений по аэроснимкам следует использовать лишь упоминавшуюся выше центральную их часть. Исходя из этого съемка осуществляется с продольным перекрытием (вдоль съемочного маршрута) в 60% и с поперечным (между маршрутами) – 20–25%.

12.4. Тон изображения природного объекта (или степень потемнения эмульсионного слоя фотоматериалов) находится в прямой зависимости от отражательной способности его поверхности, степени освещенности солнцем и некоторых других факторов.

12.5. Наиболее реально получить изображение с разрешающей способностью до 20 линий на 1 мм. Исходя из этого при известном масштабе залета можно определять наименьшую величину элементов местности, которые отображаются на снимках. С другой стороны, зная минимальные размеры объектов местности, которые необходимо опознать на аэрофотоснимках, можно определить оптимальный масштаб залета.

При подборе соответствующих аэрофотоматериалов и фотохимикатов получаемые аэрофотонегативы дают возможность получить на снимке 4-

и 5-кратное увеличение.

Указанная выше разрешающая способность современных аэрофотосистем (АФА-аэрофотоматериалы) касается главным образом изображения рядом расположенных контрастных по тону объектов. С уменьшением контрастности таких объектов происходит некоторое уменьшение реальной разрешающей способности аэрофотоматериалов.

Однако высокую разрешающую способность имеют лишь линейные элементы местности, например светлая тропа на темном фоне травы или темный ствол дерева на фоне сухого песчаного пляжа и т.д. В то же время контуры округлой или иной нелинейной формы трудно, а порой совсем не опознаются даже при поперечнике до 0,3 мм.

12.6. При проведении изысканий часто приходится иметь дело со значительными площадями, которые могут быть зафиксированы лишь совокупностью в несколько десятков или даже сотен аэрофотоснимков. Для общего их обзора после нумерации негативов и изготовления контактных отпечатков делается накидной монтаж. Главное назначение накидного монтажа – объективная оценка качества залета и изготовления однотонной контактной печати снимков. Так, по нему выявляется полнота и правильность покрытия площади съемочными маршрутами: соблюдение нормативов прямолинейности, отсутствие разрывов между маршрутами или чрезмерного поперечного и продольного перекрытия. По накидному монтажу выявляется также "елочка", обусловленная непараллельностью оси камеры АФА линии маршрута полета, соответствие расчетного количества аэрофотоснимков фактическому и некоторые другие показатели.

12.7. После разбивки монтажа на участки и нумерации последних изготавливается репродукция накидного монтажа обычно с уменьшением в 3–5 раз, в масштабе 1:50000, 1:100000 и т.д., в зависимости от масштаба залета. Помимо создания условий для обзора района работ, репродукция накидного монтажа удобна для опознавания на отдельных снимках конкретных мест, для поиска снимков в большом съемочном массиве и т.д. Поэтому такие репродукции являются неотъемлемой частью конечной продукции летно-съемочных работ.

12.8. Часто бывает необходимо непосредственно при проведении полевых работ выполнять дешифрирование снимков, например оконтуривать площади одинакового содержания. Так возникает необходимость в изготовлении фотосхем. Они представляют собой монтаж вырезанных и наклеенных на картон или на другую жесткую основу центральных частей аэроснимков. Эти неуточненные или мозаичные фотосхемы могут создаваться на небольшие участки или одна на всю снятую территорию, в зависимости от количества изыскательских подразделений, необходимости срочной сдачи работ по частям и других обстоятельств.

12.9. В том случае, когда по условиям работы данные изысканий должны наноситься на точную карту, из аэрофотоснимков изготовляют уточненную или приведенную фотосхему. Она представляет собой монтаж на жесткую основу центральных частей аэрофотоснимков, которые посредством оптических преобразований исправлены на рельеф и приведены к заданному масштабу. Непостоянство масштаба снимков связано с тем, что вследствие постоянных турбулентных потоков воздуха самолет практически невозможно удержать на заданной высоте и в нужном положении. Для трансформирования снимков за наклон получают данные со специально установленного на АФА уровня, а масштаб каждого снимка определяют по показаниям радиовысотомера.

Если снимки, помимо приведения к единому масштабу, исправлены за рельеф и за наклон оптической оси АФА в момент съемки и ориентированы относительно сторон горизонта, то такой монтаж называют фотопланом.

12.10. По паре смежных, частично перекрывающихся отпечатков (на величину около 60%) можно воссоздать пространственную (стереоскопическую) модель изображенной на них местности. По ней получают не только плановые, но и вертикальные (высотные) характеристики, т.е. с приемлемой точностью определяют высоты форм рельефа и других природных объектов. Для этой цели существует ряд приборов, с помощью кото-

рых рассматривают и измеряют превышения одних объектов относительно других с заданной точностью в зависимости от масштаба залета и назначения работ.

Воссоздаваемая по стереопаре аэрофотоснимков объемная модель местности позволяет в процессе предварительного камерального анализа выявлять основные черты морфологии участка, судить об определяющих ее свойствах пород и, таким образом, подойти к изучению геологического строения и других характеристик региона. Еще более важен стереоскопический просмотр изучаемой территории при проведении полевых изысканий, когда в результате дешифрования аэрофотоснимков создаются лучшие условия, например для прослеживания одноименных пластов пород, границ между ними и т.д.

12.11. Сейчас применяются новые виды съемок, которые, однако, по способности передавать детали местности не могут заменить черно-белые аэрофотоснимки, а лишь дополняют их. Первыми среди них следует назвать съемки с получением цветных снимков, на которых отображаются в близких к естественным краскам все природные объекты местности. Это помогает опознавать надежнее, например, разные типы почв, горных пород и др. Иногда применяются также цветные спектрозональные снимки, которые передают объекты в неестественном искаженном цвете и тем подчеркивают ряд особенностей ландшафта, например переувлажненные почвы.

Опытно-производственные масштабы приобретает радиолокационная съемка, главное достоинство которой заключается в возможности проведения залетов при сплошной облачности в любое время суток. Однако вследствии мелкомасштабности (1:100000 и 1:200000) и строчного принципа фиксации изображения на фотопленку, разрешающая ее способность часто на порядок ниже, чем аэрофотосъемки.

Широко начинают применяться также инфракрасная и радиотепловая аэросъемки, позволяющие выявлять участки термальных аномалий в пределах суши или акватории, например термальные источники, сбросы промстоков и др.

12.12. Основной объем аэрофотосъемочных работ общего назначения в нашей стране выполняется специализированными территориальными подразделениями Гражданского Воздушного флота – отрядами спецприменения. Производимые ими аэрофотоматериалы отвечают единым, наиболее высоким требованиям.

Меньший объем аэрофотосъемок выполняют ведомственные организации. Среди них следует назвать, например, Всесоюзный институт сельскохозяйственных аэрогеодезических изысканий (ВИСХАГИ), институт "Леспроект", объединение "Аэрогеология" и Лаборатория аэрометодов при этом объединении.

Общие сведения по дешифрированию аэрофотоснимков

12.13. Дешифрирование аэрофотоснимков представляет собой получение максимального объема сведений об изучаемом районе на основании анализа взаимосвязей, существующих между характером и распределением отобразившихся на снимках элементов ландшафта и внутренним их содержанием.

12.14. Признаки, с помощью которых выявляются или дешифрируются условия участка, делятся на прямые и косвенные. К прямым признакам относятся такие, которые свойственны самим объектам местности и которые в то же время непосредственно отображаются на аэрофотоснимках: форма, размеры и тон изображения, определяемый цветом и отражательной способностью каждого компонента. Это, к примеру, длинные гряды или почти белый тон изображения песчаной поверхности, обладающей высокой отражательной способностью.

К косвенным признакам относятся такие, которые служат лишь индикаторами, указывающими на наличие конкретных объектов природной среды или присущие им определенные свойства, специфические особенности.

Так, ряд изобразившихся на снимках небольших озер на поверхности надпойменной террасы может указывать на залегание под поверхностными песчаными или супесчаными отложениями водоупорных глин.

12.15. Обычно для опознавания и изучения природного объекта используют не один, а всю возможную совокупность как прямых, так и косвенных дешифровочных признаков, благодаря чему они как бы дополняют друг друга. Происходит, таким образом, многократное опознавание объектов и одновременно уточнение заключения о их состоянии, свойствах.

Для получения сведений, непосредственно не отображающихся на аэрофотоснимках, используется ландшафтный подход к дешифрированию. Он состоит в привлечении всего комплекса сведений о геолого-географических условиях территории, а также известных закономерностях в распределении и приуроченности каждого из компонентов природной обстановки для получения требуемых заключений.

12.16. По аэрофотоснимкам ранее всего и наиболее определенно дешифрируется ряд свойств слагающих грунтов. Вместе с воспринимаемым на пространственной модели рельефом это создает благоприятные предпосылки для выяснения других природных условий территории. Лишь затем, привлекая другие признаки и индикаторы, осуществляя анализ и сопоставление, выявляются, например, геолого-структурная обстановка, геологическое строение района.

12.17. Дешифрирование аэрофотоснимков, т.е. опознавание форм и выяснение содержания изображенных на них объектов местности распадается на два этапа. Первый из них – предварительное или камеральное дешифрирование, второй – полевое дешифрирование.

12.18. Камеральное дешифрирование начинается с просмотра аэроснимков, прежде всего со стереоскопического просмотра изображенной на них местности, для предварительного ознакомления с участком предстоящих изысканий.

Затем переходят к более тщательному просмотру и анализу изображения не только на единичных аэроснимках, но также на воссоздаваемой по ним пространственной модели. На этом этапе осуществляется распознавание или дешифрирование форм рельефа и их генезиса, определяющих свойств и особенностей слагающих их грунтов, геолого-структурной обстановки, гидрогеологических условий и др.

Одновременно составляется карта-схема всех надежно опознанных и частично или предположительно выясненных объектов. Каждый из них наносится особым условным знаком или цветом на схему по степени достоверности опознания с целью соответствующего возвращения к ним при последующем изучении.

После завершения предварительного этапа дешифрирования аэроснимков становится ясным объем предстоящих полевых работ: устанавливаются все виды исследований, намечаются участки специального, детального и комплексного изучения. На этой основе планируются полевые маршруты для фонового и детального изучения участка, уточнения объектов. Планируются также места заложения шурфов, канав, скважин, необходимых для раскрытия содержания камерально неустановленных объектов или контуров, для документирования свойств слагающих пород, прослеживания пластов определенного состава или элементов геолого-структурной обстановки.

12.19. Полевой этап работ является наиболее трудоемким и продолжительным, но позволяет получить основные данные для изучения содержания и особенностей природных объектов.

На этом этапе получают непосредственно в натуре все качественные и количественные характеристики отображенных на снимках природных образований, прослеживают их распространие, проводят границы между ними, отбирают образцы и монолиты для выполнения анализов и определений.

Дешифрирование основных элементов ландшафта побережий

12.20. Рельеф, в отличие от других элементов ландшафта, можно непосредственно наблюдать на аэрофотоснимках благодаря возможности воссоздавать по стереопаре пространственную модель местности.

Вследствие различной величины фокусного расстояния аэрофотоаппаратов (70 или 100 мм) и расстояния наилучшего зрения человека (около 250 мм), на стереомодели происходит 2–3-кратное увеличение превышений рельефа по сравнению с действительной его величиной. Это позволяет выявить на модели не только крупные формы, но и едва выраженные его детали. Так создаются благоприятные предпосылки для установления таких свойств пород, которые связаны с характером рельефа, как, например, их трещиноватость, устойчивость, пластичность.

Иногда и при слабо выраженных понижениях побережья отмечается возрастание увлажненности грунтов, а следовательно, лучшие условия развития почвенно-растительного покрова, что обнаруживается по потемнению тона изображения. Помимо индикационной роли при выявлении форм микрорельефа, тон изображения позволяет установить места залегания на небольшой глубине водоупорных или, наоборот, водопроницаемых грунтов. Точная причина создавшегося положения в каждом случае может быть установлена при полевом дешифрировании.

Учитывая полученные по снимкам сведения о рельефе, свойствах пород и осуществляя анализ изображения (по тону и рисунку), а также стереомодели, выявляются детали и особенности, признаки и индикаторы, отражающие геологическое строение. В частности, таким путем опознаются вещественный состав, характер напластования, диагенеза, последовательная смена одних пород другими, а также устанавливаются границы между ними. При этом стратиграфическая их последовательность по аэроснимкам, как и в натуре, прослеживается от какого-либо маркирующего горизонта, а затем уточняется при полевом дешифрировании.

12.21. Почвы и растительность чаще всего определяют основной фон аэрофотоизображения – его тон и рисунок, а также зачастую являются индикаторами геологического строения, гидрогеологических условий и некоторых других компонентов природной обстановки. Благодаря этому, при дешифрировании указанным компонентам ландшафта необходимо уделять очень важное внимание.

На аэроснимке (рис. 11), несмотря на определяющую роль подстилающей породы в формировании общего облика, тон и рисунок ее изображения отчасти маскируется перекрывающим маломощным слабогумусированным почвенным слоем. Там, вследствие малой мощности последнего, он определил светло-серый тон изображения (о).

На аэроснимке (рис. 12) при сходном общем облике поверхности, т.е. при относительной однородности серого тона и полосчатого рисунка, вызванного развитием слабовыраженных в рельефе ложбин стока, все же преобладающая часть территории приобрела более темный тон изображения. При полевом дешифрировании установлено, что такое положение здесь определяет сформированный более мощный глубоко гумусированный почвенный слой на четвертичных суглинках. В то же время в правом верхнем углу снимка (г) при том же внешнем характере рисунка наблюдается более светлый тон изображения из-за уменьшения мощности гумусового горизонта. Наиболее темный тон изображения большого прямоугольного массива (з) объясняется недавней его вспашкой, т.е. более шероховатой поверхностью и потому повышенным рассеянием отраженного света.

Еще более светлый тон изображения общего фона и деталей побережья наблюдается на крупномасштабном аэрофотоснимке рис. 13. На нем представлено сочетание светлых, местами почти белых (а), серых, изредка практически до черных (в) тонов. Наиболее темный тон – изображение водоемов, равные глубины которых определяют вариации потемнения, а неодинаковая интенсивность светлого тона вызвана различным содержанием соответствующих контуров. Так, светло-серое изображение более всего опре-

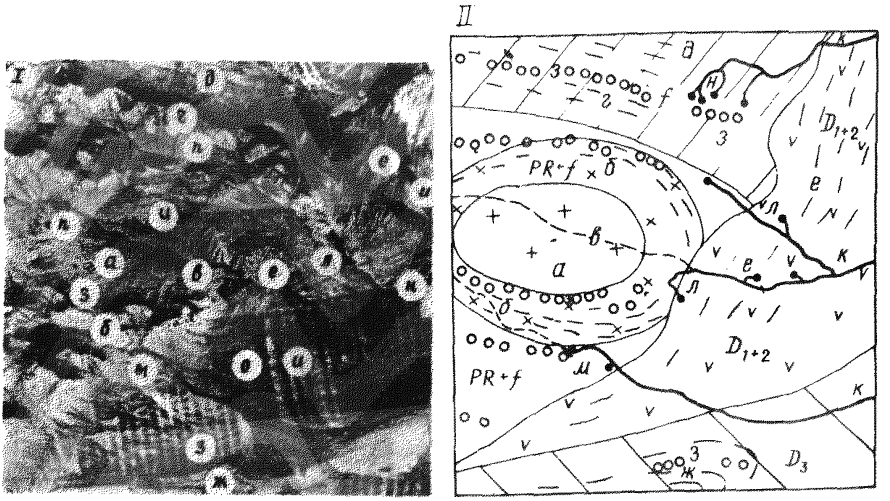


Рис. 11. Мелкомасштабный аэрофотоснимок (I) и схема дешифрирования (II) побережья водохранилища
а – интрузивное тело гранитов; б – окружающие его дуги-гряды метаморфизированных в приконтактовой зоне сланцев, известняков протерозой – нижнего кембрия; в – русло рассекающей их балки; г – гряда доломитов, песчаников, известняков протерозой – нижнего кембрия; д – гряды песчаников, алевролитов нижнего кембрия; е – гряды порфиритов, доломитов, известняков нижнего девона; ж – пологая гряда слабо литифицированных песчаников верхнего девона; з – хвойно-лиственный лес на северных склонах гряд; и – пашни; к – балки с водотоками; , м, н – источники грунтовых вод; о – полосчато-струйчатый рисунок аккумулятивной равнины; п – шлейфы делювиально-пролювиальных накоплений в основании склонов

деляется сложением поверхности песками с очень слабым гумусовым горизонтом. В понижениях слой гумуса и увлажнение больше, что вызывает потемнение изображения (б). На крутых откосах микрорельефа (ж) и в прибрежной полосе (г) водоемов, где почвенный слой практически отсутствует, изобрежение приобретает почти белый тон.

Промежуточные серые тона на рис. 13 определяются не только почвенным покровом, но и травянистой (б) или кустарниковой растительностью (е). Кусты изображаются в виде крупных темных, почти черных точек или небольших пятен темного тона. Но местами в прибрежной полосе водоемов отмечается серый мелкозернистый рисунок фотоизображения (л) прибрежной растительности.

Сплошной высокостойный лес на крупномасштабных аэрофотоснимках изображается специфическим зернистым рисунком серого, часто темно-серого тона (рис. 14, I), отдельные "зерна" которого – кроны деревьев и тени от них.

На аэрофотоснимках масштаба 1:25000 – 1:50000 в большинстве случаев сохраняется еще зернистый рисунок изображения лесных массивов, уменьшаются лишь поперечники "зерен". Такая структура исчезает лишь на снимках кустарниковой растительности, изображение которой приобретает серый тон, отличающийся от изображения травостоев заметно большим потемнением (рис. 14, I· *а, е*).

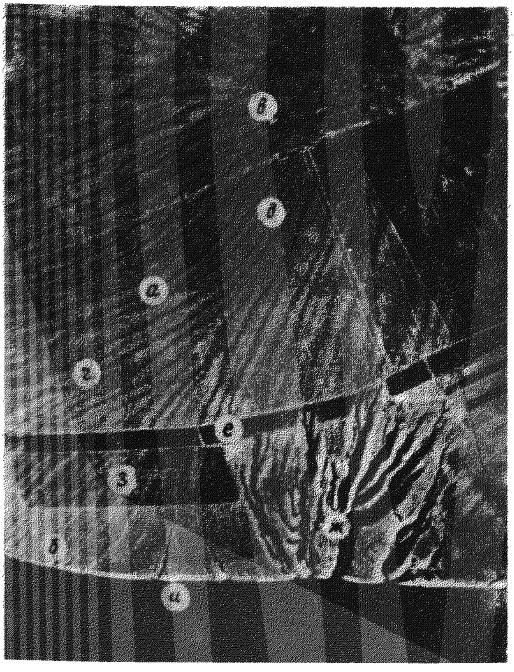


Рис. 12. Среднемасштабный аэрофотоснимок высокого побережья, сложенного с поверхности облессованными суглинками

а – слабо выраженные в рельефе ложбины стока; б – изредка встречающиеся промоины, рытвины на их продолжении; в – просадочные западины иногда с глинистым осадком в центре – светлый тон; г – более смытые; д – менее смытые почвы; е – лесопосадки; ж – крупная разветвленная балка; з – свежевспаханные поля; и – размываемый волнами берег

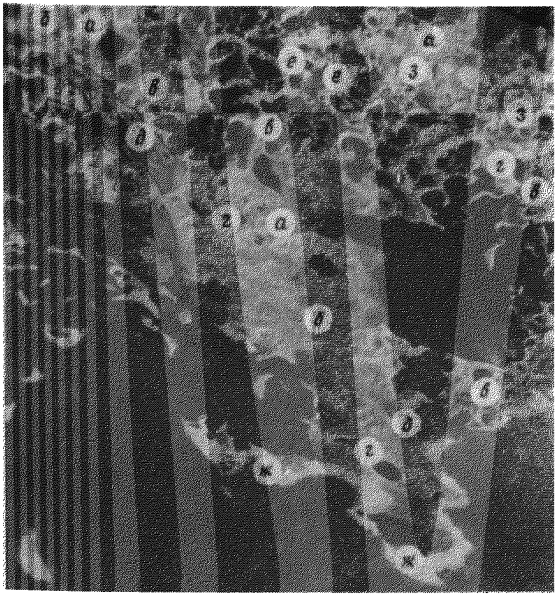


Рис. 13. Крупномасштабный аэрофотоснимок песчаного побережья Цимлянского водохранилища

а – наиболее светлые контуры – повышения микрорельефа, лишенные растительности; б – выровненные понижения, занятые травянистой растительностью; в – эоловые переуглубленные понижения, занятые водой; г – берег их подчеркивается светлой полоской – пляжем; д – прибрежно-водная растительность; е –отдельные кусты и группы деревьев; ж – размываемое волнами песчаное побережье; з – современные дефляционные котловины

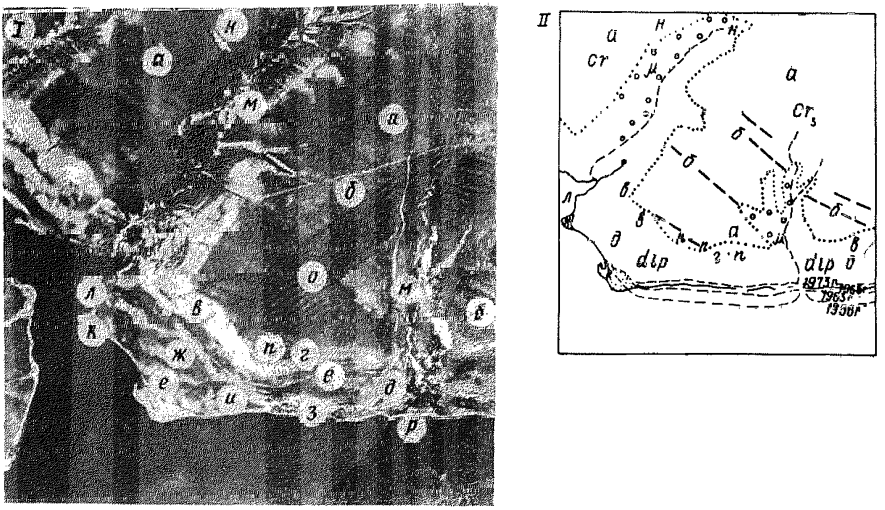


Рис. 14. Крупномасштабный аэрофотоснимок (I) и схема дешифрирования (II) высокого побережья водохранилища
а – высокая денудационная поверхность; б – линейные микропонижения на ней, связанные с крупной трещиноватостью верхнемеловых карбонатных пород; в – крутой высокий надоползневой уступ, покрытый со стороны водохранилища травянистой растительностью; г – оползневая трещина на нем; д – древнеоползневая поверхность; е – осложняющие ее валы; ж – разделяющие понижения; з – наиболее разрушенная свежими трещинами ее часть; и, к – аккумулятивные косы; л – неразмываемый берег в заливе; м –балка с разреженным лесом и растущими вершинами; н, о – лесопосадки; п – точки-реперы, использовавшиеся для проведения береговой линии разных лет с повторных аэрофотоснимков и определения величин размыва берега; р – участок интенсивного размыва берега с выступами, обрушивающимися глыбами

На более мелкомасштабных аэрофотоснимках изображение лесных массивов теряет зернистую структуру и приобретает довольно однообразный темно-серый тон (рис. 14, *1: б, г, з*).

12.22. Гидрогеологические условия любого региона определяются рельефом, геологическим строением, свойствами слагающих пород, почвенно-растительным покровом и др. Отсюда дешифрирование этого компонента ландшафта с помощью аэрофотоснимков осуществляется косвенно – путем опознавания особенностей перечисленных компонентов. В частности, анализ тонов и рисунка изображения на аэрофотоснимках, просмотр пространственной модели позволяют судить по растительности, формам рельефа и другим индикаторам о выходах источников, степени увлажненности побережья, глубине залегания подземных вод, наличии водоупорных горизонтов и т.д. Различное состояние гидрогеологических условий опознается не только на крупномасштабных, но и на мелкомасштабных аэроснимках.

Дешифрирование берегоформирующих процессов и явлений

12.23. Развитие берегоформирующих процессов приводит к образованию лишь им присущих форм рельефа. Поскольку формы рельефа выявляются на пространственной модели, то по ним устанавливаются и форми-

рующие их процессы. Это создает благоприятные условия применения материалов аэрофотосъемки для изучения геодинамических преобразований территорий. Аэроснимки незаменимы при получении количественных характеристик берегоформирующих процессов, для чего прибегают к использованию снимков повторных аэрозалетов.

Ниже рассмотрено дешифрирование лишь наиболее распространенных берегоформирующих процессов и явлений, которые непосредственно связаны полностью или частично с гидрологическим режимом водохранилищ.

12.24. Различные сочетания условий ландшафта побережья и воздействующих гидрологических процессов, происходящих в водохранилище, приводят к большому разнообразию форм и масштабов изменения берегов, темпов и последовательности развития здесь берегоформирующих процессов и явлений.

Основными признаками дешифрирования на аэрофотоснимках переформирования берегов водохранилищ являются тон изображения и вид, профиль формирующихся берегов. Обычно склоны долин в естественных условиях покрыты растительностью. Образование водохранилища вызывает размыв откосов (обнажение коренных пород) или аккумуляцию рыхлого материала в зоне нового уреза воды. В результате изображение деформируемых частей склонов приобретает светлый, нередко практически белый тон (рис. 13).

На берегах, сложенных разными по составу и свойствам породам, при разных типах рельефа склонов отмечаются различные виды деформаций: обвалы, осыпи, оползни, плывуны и др. Поскольку на пространственной модели надежно опознаются образующиеся формы микрорельефа берегов, то по ним, следовательно, можно установить формирующие их процессы и, таким образом, предвидеть характер последующего развития берегов, осуществлять их типизацию.

При сравнении снимков повторных аэрозалетов выявляются участки размыва берегов и аккумуляции твердого материала, определяются площади и объемы размытого грунта.

12.25. Для проведения количественных определений размыва берегов следует брать за основу аэрофотоснимки первого залета после наполнения водохранилища и сравнивать их с полученными до образования водоема, а затем после его наполнения.

Определение размыва следует начинать с установления масштаба каждого аэроснимка первого залета с помощью показаний радиовысотомера по формуле (89).

Затем при стереоскопическом просмотре на снимках, полученных до образования водоема, наводят линию первоначального его уреза. Для этой цели используют как вспомогательные аэроснимки первого залета после наполнения водохранилища, поскольку на них нередко отображаются следы первого уреза у отлогих побережий или в заливах по балкам. Затем линию начального уреза переносят на снимки-основу и от него производят отсчеты величин размыва берегов (рис. 14, I).

Перенос линии первоначального уреза, как и линий уреза со снимков последующих залетов, целесообразно осуществлять с помощью пропорционального циркуля (или пропорционального треугольника). Для этого на сравниваемых снимках находят изображение одних и тех же точек – кустов, деревьев, вершин и изгибов оврагов и др., которые используют в качестве исходных. От них измеряют расстояние до уреза и переносят таким образом линию уреза на принятый за основу снимок (рис. 14, I: п).

С помощью палетки можно определить площадь размыва побережья между двумя линиями – залетами или за весь период существования водохранилища. Погрешность таких определений, как показывает практика, составляет 5–7%.

При наличии ряда полевых замеров высот берега и полученных указанным выше путем определений площади размыва побережья можно вычислить объем размытого грунта. Замеры высот берега можно произвести также по аэрофотоснимкам с помощью стереоприборов. Точность их будет ниже, чем при наземных определениях. Однако для решения некоторых

задач, особенно при необходимости массовых замеров высот на отдельных, в том числе на недоступных участках, такие замеры являются приемлемыми. Важно, что они проводятся без выезда на место.

12.26. По крупномасштабным аэрофотоснимкам надежно выявляются все типы стабильных и динамичных оползней (рис. 14, I: *д, г, и*). Уверенно устанавливаются не только подвижки вообще, но все имеющиеся на поверхности детали: трещины, блоки, участки разрушения грунта до бесструктурного состояния (*з*). Дешифровочными признаками старых и возобновляющихся подвижек оползней являются тон, рисунок изображения, вид и размеры деталей, в частности трещин. При полевом дешифрировании устанавливаются состав, прочностные свойства пород, степень разрушения и глубина захвата подвижкой склонов, влажность пород и дебит выходов подземных вод, т.е. характеристики, непосредственно не отображающиеся на аэрофотоснимках.

12.27. С меньшей детальностью дешифрируются оползни на более мелкомасштабных аэрофотоснимках (рис. 15). Здесь светло-серый тон – изображение гряд, валов; почти белый – более свежие нарушения их массива; полосчатый рисунок – вновь возникшие оползневые трещины. Возможность опознавания перечисленных и других признаков современного состояния оползней гарантирует уверенное оконтуривание и картирование старых оползневых массивов и свежих подвижек на их фоне.

12.28. На мелкомасштабном аэрофотоизображении ($\approx$ 1:100000), представленном на рис. 11, в том числе при просмотре пространственной модели, оползни также опознаются уверенно. При этом выявляются не только крупные, но и небольшие оползни, поперечник которых на снимке едва превышает 1 мм. На мелкомасштабных аэроснимках не выявляются лишь некоторые детали, например небольшие трещины. Основными дешифровочными признаками остаются плановые очертания и специфический поперечный профиль оползней, а также серое, часто пятнистое их изображение (рис. 11, I: *е, ж*). Так, на снимке рис. 16, I подавляющее большинство оползневых массивов приобрело циркообразную форму. Надоползневой откос крутой и занят преимущественно березовым древостоем, определяющим почти черный тон изображения. Расположенное ниже слабо подвижное тело пластического типа имеет более пологий наклон. На поверхности передней части оползни часто отмечаются неровности, вызванные неравномерными пластическими его подвижками. Последнее обусловило общий пестрый вид изображения этих частей оползней на рис. 16, 1: *е*.

12.29. На высоких береговых склонах водохранилищ, сложенных скальными и полускальными породами, при слабых пластовых водопроявлениях в основании склона формируются, как правило, оползни фронтального типа, типичный вид которых представлен на рис. 14, I. При водопроявлении в срединной части склонов образуются циркообразные оползни. При выходах грунтовых вод в верхней части склона чаще всего формируются оползни-потоки, также уверенно устанавливаемые на аэрофотоснимках.

Таким образом, на снимках практически всех масштабов не только опознаются оползни, но и выявляются их типы, что нередко имеет важное практическое значение.

С помощью аэрофотоснимков можно определить также площадь разрушения склона свежими оползнями (можно и площадь древнеоползневой поверхности). Для этого после определения масштаба снимка на нем проводят по наиболее удаленным трещинам верхнюю границу захвата откоса новыми подвижками. Затем с помощью палетки определяют площадь между этой границей и линией берега – площадь свежеоползневого нарушения. При наличии ряда полевых замеров (или определения с помощью стереоприборов) мощности вовлеченного в подвижку грунта можно вычислить его объем.

Проведение повторных аэросъемок дает возможность выявлять разрушение склонов каждым новым смещением, определять прирост площади развития оползней во времени, а следовательно, получить материал, который может быть использован для прогнозного заключения о характере оползневой деятельности.

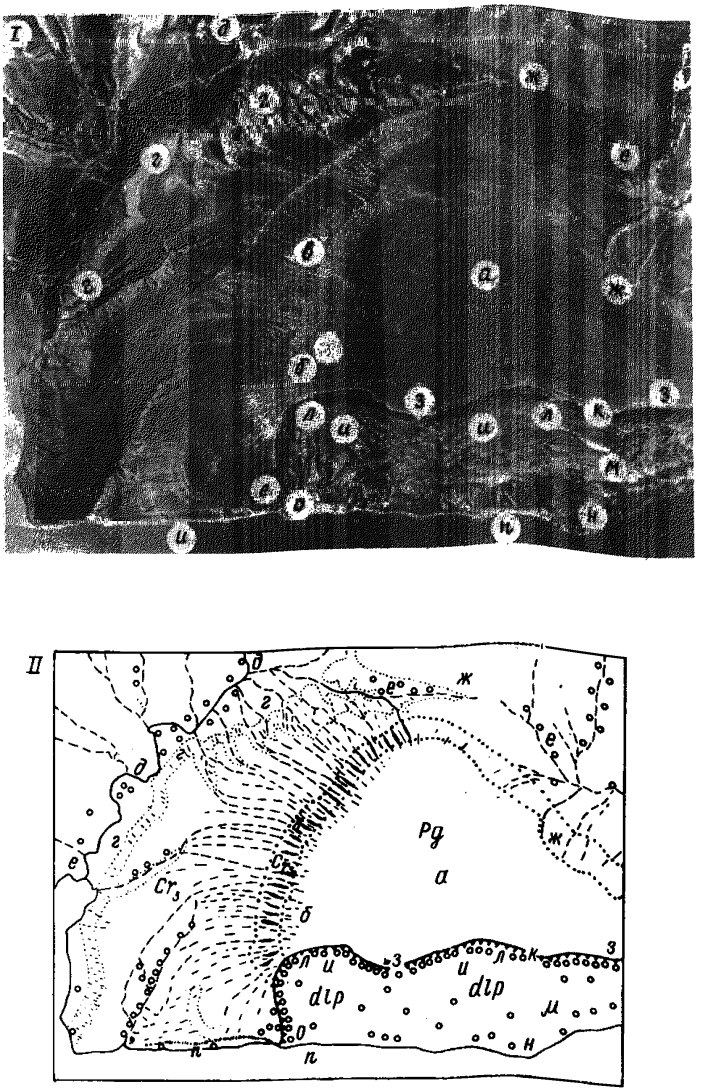


Рис. 15. Среднемасштабный аэрофотоснимок (I) и схема дешифрирования (II) высокого побережья водохранилища

а – выровненная денудационная поверхность; б – внешний край слагающей сверху пачки песчаников палеогена со слабоврезанными ложбинами стока; в – светло-серая полоса склона, представленная карбонатными породами верхнего мела, трещиноватость которых определила более глубокий врез эрозионных ложбин; г – крупная балка с сильно расчлененным основанием левого склона, сложенного карбонатными породами верхнего мела; д – водоток в ней; е – отдельные деревья и группы их на склонах; ж – растущие верховья оврагов; з – надоползневой откос крупного древнего оползня; и – то же, осложненного валами – светлый тон, понижениями – темные полосы; к – то же, обрушения поверхностного грунта – светлый тон; л – полоса деревьев – черный тон на надоползневом откосе; м – свежие оползневые трещины; н, о – выступы берега, возникшие в результате свежих оползневых подвижек и шлейфы мутной воды у них; п – размываемый волнами берег

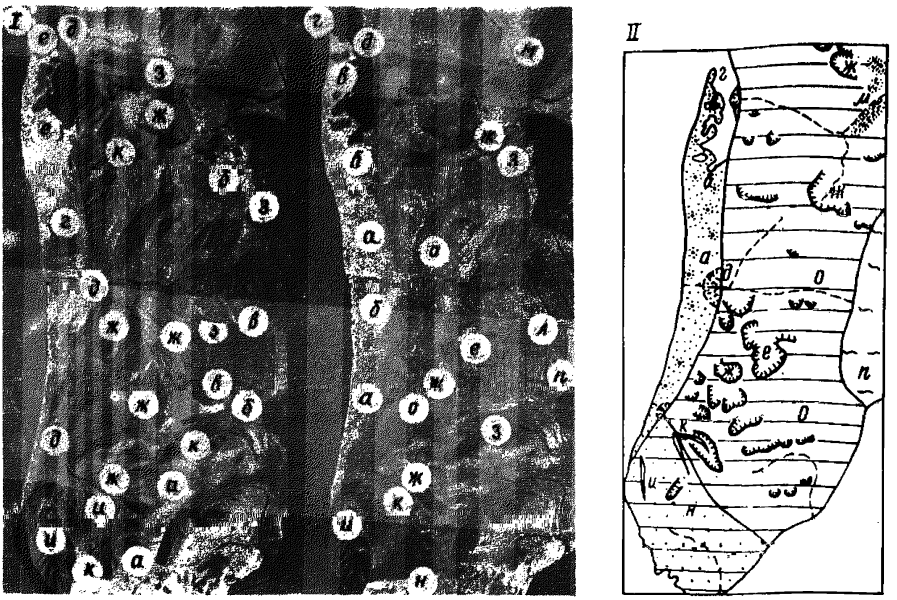


Рис. 16. Стереопара мелкомасштабных аэрофотоснимков (I) и схема дешифрирования (II) высокого побережья водохранилища
а – надпойменная терраса; б – современные развеваемые пески на ее поверхности; в – затопленные водохранилищем эоловые котловины; г – размываемые пески вблизи них; д – конусы выноса балок; е – наиболее крупный пластический оползень с крутым передним краем; ж – меньшие пластические оползни; з – куртины леса на них; и, к – селеопасные накопления в тальвеге балок; л – лесополосы; м – микроформы рельефа, образованные слабым смещением поверхностного слоя грунта; н – участок, сложенный дислоцированными отложениями верхнего девона; о – то же, нижнего карбона, п – то же, четвертичными отложениями

Применение аэрофотосъемки для изучения гидрологических процессов в водохранилищах

СЪЕМКА ТЕЧЕНИЙ

12.30. Съемка с самолета поверхностных течений может применяться при любых гидрологических условиях и позволяет в сжатые сроки охватить наблюдениями значительные акватории. Существуют два метода измерения течений с самолета: одиночными поплавками и донными индикаторами. Оба метода имеют самостоятельное значение.

12.31. Одиночные поплавки применяются для измерения как поверхностных, так и глубинных течений.

Общий вид и схема поплавка для измерения поверхностных течений даны на рис. 17,*а, б*. Поплавок представляет собой небольшой мешок из плотной ткани или клеенки размером около 7х12 см, в который помещается краситель и пенопласт для обеспечения плавучести. Для ослабления влияния ветрового дрейфа на измерение скорости течения к поплавку на прочной нити длиной 1–5 м крепится демпфер из дюраля или жести толщиной до 0,5 мм размером в несколько раз больше площади поплавка (17х12 см). В качестве красителя в поплавке используется порошок уранина, дающий

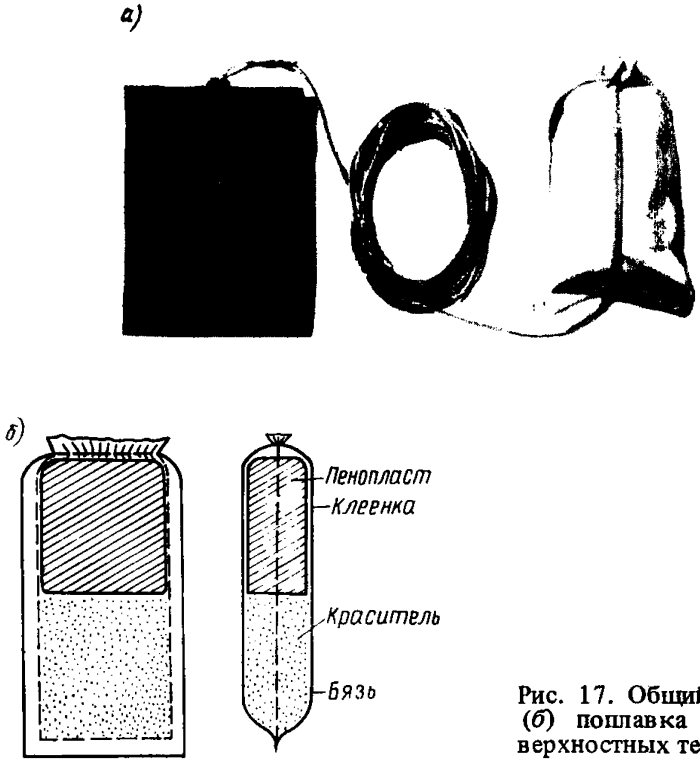


Рис. 17. Общий вид (*а*) и схема (*б*) поплавка для измерения поверхностных течений

при растворении в воде яркое зеленое пятно.

В воде поплавок располагается вертикально. Раствор красителя при этом окрашивает воду, просачиваясь только через вшитую в плотную ткань поплавка бязь (рис. 17, *б*). Уровень заполнения мешочка красителем определяет срок его действия. При среднем волнении 35–40 г уранина обеспечивают работу поплавка до 2–2,5 ч.

Для измерения течений в глубинных слоях воды (более 3–5 м) используются специальные поплавки, снабженные матерчатым парусом, имеющим значительно большую площадь, чем металлический демпфер. Длина нити, соединяющей парус и поплавок, должна соответствовать глубине слоя, в котором измеряется скорость течения. Отношение площади паруса к площади поперечного сечения поплавка строго не лимитируется, но обычно должно составлять от 10 до 20. Парус и нить сматываются с поплавка только в воде после растворения специального стопора из прессованной соли.

12.32. Наиболее просто скорость и направление течения по одиночным поплавкам определяются в тех случаях, когда возможно получить на каждом аэрофотоснимке изображение по крайней мере двух неподвижных (опорных) объектов. Тогда, произведя дважды через интервал времени Δt аэрофотосъемку сброшенных с самолета поплавков, можно, используя неподвижные объекты, нанести на один из аэроснимков второе положение поплавка и, зная масштаб снимка, измерить графически путь x, пройденный поплавками. После этого скорость течения W определяется по формуле

$$W = x/\Delta t. \qquad (90)$$

Такой способ измерения возможен вблизи берега или каких-либо неподвижных объектов.

Для измерения течения в точках, удаленных от берега, применяется маршрутная аэрофотосъемка. Выполнение летных работ при такой съемке начинается с разброса поплавков по всему маршруту. Затем маршрут дважды фотографируется. При этом интервал времени Δt между съемками выбирается в зависимости от скорости течения, длины маршрута и требуемой точности получения результатов.

Для обеспечения в последующем монтажа маршрутов поплавки сбрасываются с таким расчетом, чтобы в перекрывающиеся части снимков попало не менее трех поплавков. Конечные снимки маршрутов вместе с поплавками должны захватывать опорные пункты. Векторы пути L, пройденные поплавками под действием течения за интервал времени Δt, определяют по расстояниям между изображениями идентичных поплавков на кальках монтажа первого и второго залетов данного маршрута, совмещенных между собой по изображениям неподвижных объектов. Скорость течения определяется по формуле (90), а направления векторов течения находятся с помощью курса самолета, фиксируемого в процессе съемки, и углов между направлением маршрута и векторами течений, измеряемыми графически на кальке.

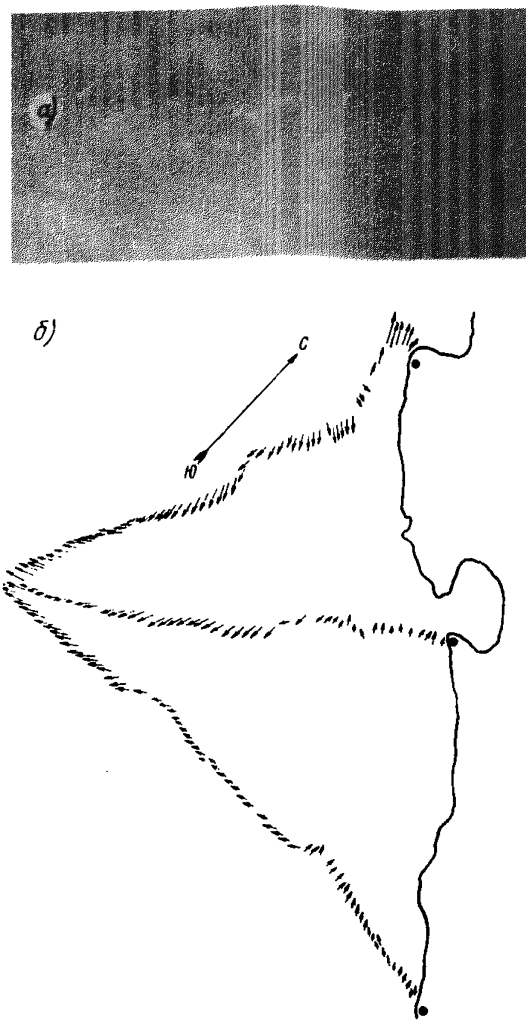


Рис. 18. Аэрофотоснимок с изображением поплавков (*а*) и схема течений (*б*), полученная методом трилатерации

Длина аэрофотосъемочных маршрутов устанавливается в зависимости от заданных технических условий, допустимой точности измерения скорости течения и выбранного интервала времени между двумя последовательными аэрофотосъемками с помощью номограммы, приведенной в прил. 1 (рис. 26).

Каждый маршрут должен привязываться к двум опорным пунктам, расположенным на его концах. В качестве опорных пунктов можно использовать любые неподвижные объекты, а также замаркированные красителем буи, устанавливаемые с катеров или непосредственно с самолета. Привязка маршрутов небольшой длины (до 7 км) может осуществляться и к двум опорным пунктам, расположенным на одном конце маршрута.

12.33. Для определения течений может использоваться также метод трилатерации. В этом случае прокладка маршрутов осуществляется от бере-

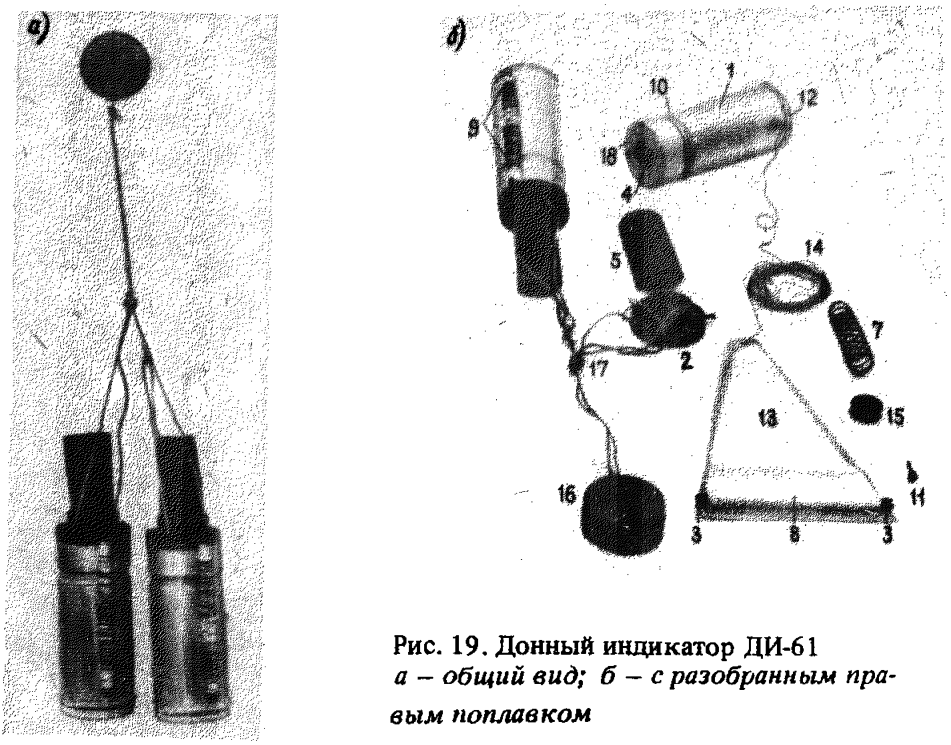


Рис. 19. Донный индикатор ДИ-61
а – общий вид; б – с разобранным правым поплавком

говых опорных пунктов к общей точке в открытой части водоема, в качестве которой используется один из подвижных поплавков, называемый узловым. В наиболее простом случае прокладывается два маршрута, образующих треугольник с вершинами в двух береговых неподвижных пунктах и узловом поплавке. Возможна прокладка и большего числа маршрутов, сходящихся в одном узловом поплавке.

По изображениям поплавков на аэроснимке выполняется монтаж маршрутов на кальке, в результате чего находят длины маршрутов между опорными пунктами и узловым поплавком. Для каждого маршрута определяются две длины, отвечающие первой и второй аэрофотосъемкам и соответствующим положениям узлового поплавка.

Затем по известным координатам или заданному графически положению опорных пунктов и длинам маршрутов определяются два положения узлового поплавка, фиксирующих вектор его пути между двумя последовательными аэрофотосъемками. Это сводится к решению двух линейных засечек графическим или аналитическим способом. Первое положение узлового поплавка находится по длинам маршрутов, отвечающим первой аэрофотосъемке, а второе – по длинам, отвечающим повторной съемке.

Последующая обработка выполняется для каждого маршрута самостоятельно. Для этого на кальке монтажа первого залета при узловом поплавке строится в масштабе съемки вектор его пути, а совмещение калек монтажа данного маршрута осуществляется по неподвижным береговым пунктам и соответствующим положениям узлового поплавка. Определение векторов течения для промежуточных поплавков выполняется так же, как и для одиночных маршрутов.

В качестве примера на рис. 18 *а, б* приведены аэрофотоснимок с изображением поплавков и схема течений, полученная с самолета методом трилатерации.

12.34. Измерение течений с применением донных индикаторов заключается в следующем: с самолета в водоем сбрасывается устройство – донный индикатор, который, погрузившись на дно, последовательно, через заданный интервал времени Δt отпускает два поплавка, всплывающих на поверх-

ность. Вскоре после всплытия второго поплавка производят фотосъемку, получая на одном снимке изображения обоих поплавков. Измерив на снимке расстояние l между поплавками и определив по показаниям радиовысотомера масштаб снимка $1:m$, находят путь $x = l \cdot m$, пройденный первым поплавком за интервал времени Δt, а затем вычисляют скорость течения W по формуле (90). При этом предполагается, что первый и второй поплавки всплывают на поверхность в одном и том же месте, а затем некоторое время с одинаковой скоростью дрейфуют под воздействием течения.

Летно-съемочные работы по измерениям течений с помощью донных индикаторов слагаются из двух этапов: разброс индикаторов по заданному маршруту и аэрофотосъемка всплывших поплавков. Абсолютное положение поплавков в данном случае необходимо знать только для нанесения на карту точки, в которой определяется вектор течения. При этом достаточная точность обеспечивается прокладкой курса самолета по известным ориентирам, азимуту, моментам съемки и скорости самолета.

Значительно большая точность требуется при определении самого вектора течения. Наибольшие трудности возникают при обеспечении заданного интервала времени Δt между всплыванием поплавков. Практическое решение этой задачи осложняется тем, что приспособление для пуска поплавков через строго заданный интервал времени должно быть простым в изготовлении, малогабаритным, антиударным, работать на воде, легким и дешевым.

12.35. На основе опыта применения различных донных индикаторов была создана модель индикатора ЛИ-61 (рис. 19, *а*). На рис. 19, *б* показан индикатор ЛИ-61 с разобранным правым поплавком.

Индикатор состоит из поплавка и корпуса для "механизма времени". К затапливающему грузу крепятся одновременно два таких устройства. Вначале срабатывает "механизм времени", удерживающий первый поплавок, а затем – удерживающий второй. Всплывающая часть индикатора (поплавок) представляет собой легкий дюралевый стакан *1* (рис. 19, *б*), в который помещаются: вкладыш, упорный дюралевый диск *3* с колонкой *4*, полая камера или пенопласт, обеспечивающие плавучесть всего поплавка, и краситель. Вкладыш и упорный диск закрепляются в корпусе небольшой завальцовкой *10* и при разборке не изымаются, в связи с чем на рисунке не указаны. Сверху корпус поплавка закрывается бязью *12*, через которую происходит растворение красителя.

В качестве демпфера, ослабляющего влияние ветра на поплавок, используется парус из бязи *13*, к нижней части которого крепится металлический стержень *8*. При зарядке донного индикатора стержень с намотанным на него парусом *13* и нитью *14* закрепляется двумя винтами *9*, входящими в пазы стержня *8*, как это показано на рис. 19, *б*. При срабатывании индикатора демпфер освобождается. Корпус "механизма времени" соединяется с поплавком при помощи винта *11* и соляного брикета *15*. Поворот соединяемых частей исключается шпонкой *18*.

Затапливающий груз *16* крепится к корпусу "механизма времени" с помощью шнура *17*.

"Механизм времени" состоит из пружины *7*, винта *11* и брикета прессованной соли *15*. Винт 11, соединяющий корпус "механизма времени" с поплавком, проходит через отверстие в брикете и ввинчивается в колонку *4*. Пружина *7* помещается во вкладыше, находящемся в корпусе поплавка. Брикет соли, кроме своей торцовой нижней части, полностью покрыт защитным слоем (нитролаком), что обеспечивает его растворение только снизу. Как только брикет растворяясь достигает определенной толщины, силой давления пружины он разрушается, и поплавок, отделенный пружиной от корпуса "механизма времени", всплывает. В "механизме времени" должны быть строго постоянными давление пружины, размер отверстия, под которым помещается брикет из соли, и форма нижней части головки винта *11*. Интервал времени отделения поплавков в этом случае будет определяться толщиной брикета соли.

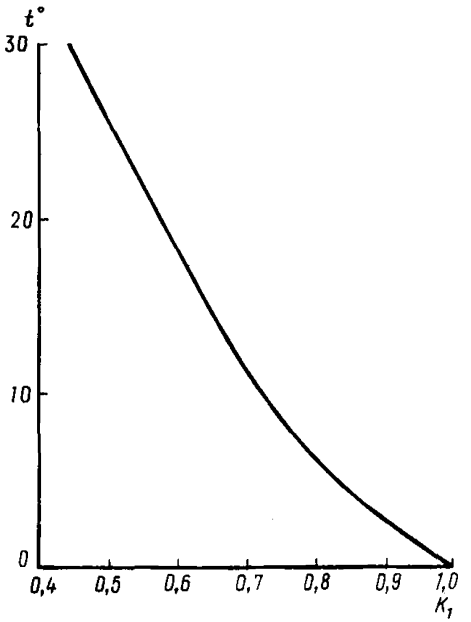


Рис. 20. График зависимости $t^o = f(K_1)$

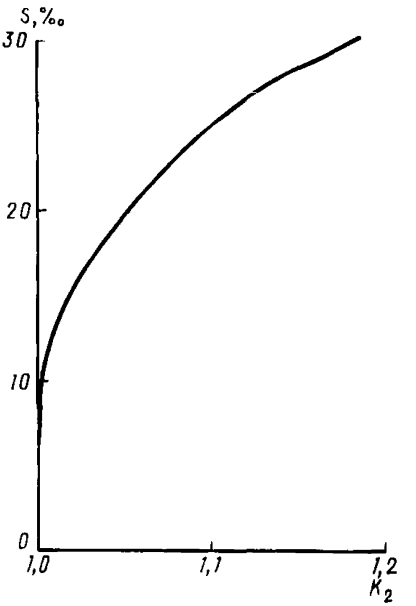


Рис. 21. График зависимости $S = f(K_2)$

12.36. Основным недостатком соляного "механизма времени" является необходимость хотя бы грубого определения температуры и солености воды, в которой работает индикатор. Поправки, вводимые в расчетный интервал времени Δt, определяются путем предварительного тарирования индикатора в лабораторных условиях.

Коэффициенты для введения поправок в значения Δt за счет разности температуры воды и ее солености выражаются формулами:

$$K_{1,i} = \Delta t_i / \Delta t_o \,; \tag{91}$$

$$K_{2,i} = \Delta t_{S_i} / \Delta t_{S_o}, \tag{92}$$

где Δt_i и Δt_o – интервалы времени при температуре воды t_i^o и $t^o = 0$; Δt_{S_i} и Δt_{S_o} – интервалы времени при солености в промилях S и $S = 0$.

Необходимые для этого данные получаются в результате специального тарирования индикаторов.

На рис. 20 и 21 даны графики, характеризующие зависимость между t^o и S и коэффициентами K_1 и K_2 .

Если индикаторы испытываются при температуре воды t_1^o и солености S_1 , а используются в воде с температурой t_2^o и соленостью S_2 , то ожидаемый интервал времени выбора поплавков Δt_2, согласно формуле (91), равен

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 K_{1.2} K_{2.2} / K_{1.1} K_{2.1}, \tag{93}$$

где Δt_1 – интервал времени, полученный при температуре t_1° и солености S_1; $K_{1,1}$ и $K_{1,2}$ – коэффициенты, определяемые по аргументам t_1° и t_2° с помощью графика, данного на рис. 20, а $K_{2,1}$ и $K_{2,2}$ – коэффициенты, определяемые по графику на рис. 21 по значениям S_1 и S_2.

Графики (рис.20 и 21) пригодны для расчета скорости растворения любых брикетов из поваренной соли, так как они выражают зависимость скорости растворения только от температуры воды и ее солености. Прочность брикета определяется технологией его изготовления, а интервалы срабатывания "механизма времени" зависят также от конструкции самого индикатора, определяющей, в частности, степень циркуляции воды около брикета и величины давления пружины на брикет. Поэтому каждая партия изготовленных брикетов должна испытываться непосредственно с тем типом индикатора, который будет применяться в работе.

Средняя квадратическая ошибка в процентах интервала Δt для данного типа индикатора с учетом вводимых поправок составляет

$$m_{\Delta t}/\Delta t = 8 - 8{,}5.$$

Полная ошибка в процентах измерения течений с помощью донных индикаторов составляет:

$$m_w/W \approx 10 - 11.$$

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНЕНИЯ

12.37. Плановый аэроснимок, близкий по своим геометрическим свойствам к плану водной поверхности, представляет собой ее детальное изображение и позволяет изучать не только элементы отдельных волн, но и характер волнения на значительной площади в зависимости от силы ветра, глубины водоема, близости береговой линии или наличия подводных препятствий.

В настоящее время наметилось два пути применения аэрофотосъемки для изучения взволнованной водной поверхности: съемка отдельными кадрами и стереофотосъемка. Каждому из них присущи определенные достоинства и недостатки. Эти способы не дублируют друг друга и имеют самостоятельное значение при изучении волнения.

12.38. Измерение длин волн непосредственно по аэроснимку является наиболее простым способом. Однако его применение возможно лишь в том случае, когда на аэроснимке бывают достаточно выражены отдельные волны каждой измеряемой системы. Разбираемым способом можно измерить длины отдельных волн, а из ряда измерений получать значение наибольшей или средней длины волны.

Для измерения длин волн на аэроснимке по направлению распространения волн прочерчивается один или несколько профилей, на которых с помощью линейки измеряют от 10 или более последовательных длин, среднее значение из которых, умноженное на знаменатель масштаба съемки, принимается в качестве средней длины волны на данном участке (рис. 22). При наличии на снимке двух или более систем волн, не совпадающих по направлению друг с другом, выполняется разделение волн на отдельные системы, а затем производятся измерения длин отдельно для каждой системы.

Разделение сложного изображения волнения на более простые элементы выполняется с помощью цилиндрической линзы. Действие линзы заключается в том, что она вызывает размыв изображения в одном направлении. При этом элементы изображения, имеющие небольшую протяженность, в направлении размыва, теряют контраст и практически исчезают. Цилиндрическая линза в специальной оправе может быть приспособлена к любому фотоаппарату для низменных съемок или репродукционных работ, например к "Фотокору".

Обрабатываемый снимок помещается перед фотоаппаратом на таком расстоянии, чтобы на матовом стекле получилось его изображение заданно-

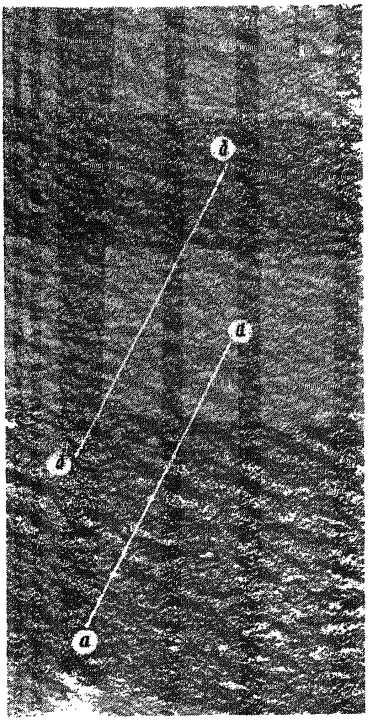
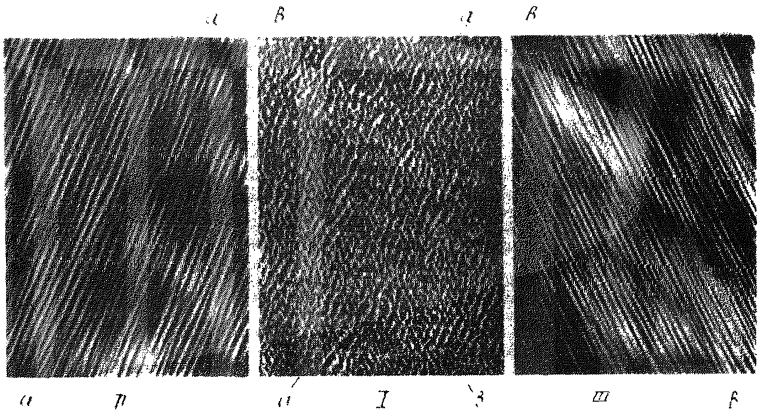


Рис. 22. Аэрофотоизображение волнения с направлением профилей

Рис. 23. Аэрофотоснимок с изображением сложного волнения (I) и его репродукции с выделенными системами волн (II, III)



го масштаба. При вращении линзы в зависимости от расположения ее оси на матовом стекле фотоаппарата поочередно будет выделяться каждая система волн. Измерение длин волн в данном случае можно производить прямо на матовом стекле или на полученной репродукции с аэроснимка. На рис. 23 приведены часть аэрофотоснимка (в центре) и две его репродукции с выделенными системами волн с гребнями, параллельными линиям *аа* и *вв*.

12.39. Принципиально отличным методом измерения плановых характеристик взволнованной водной поверхности от предыдущих способов является дифракционный метод. Идея этого способа заключается в том, что плановый аэрофотоснимок взволнованной поверхности рассматривается как естественная дифракционная решетка. Методами, известными в физике, по этой решетке можно получить дифракционную картину, а по ней все параметры решетки или, в нашем случае, плановые характеристики взволнованной водной поверхности.

Из теории дифракционных решеток известно, что положение максимумов яркости в дифракционной картине определяется уравнением

$$\sin\varphi_\lambda = n\lambda/(a+b), \tag{94}$$

где φ_λ – угол отклонения центрального луча, соответствующий n-му максимуму.

В нашем случае обычно наблюдаются только максимумы первого порядка, поэтому в дальнейшем будем считать $n = 1$;

λ – длина волны света, проходящего через решетку;

$a + b$ – ширина светлого и темного промежутка в дифракционной решетке, а в нашем случае определяемая длина волны в масштабе аэроснимка.

Можем принять $\sin\varphi_\lambda = \varphi_\lambda = K/2F$,

где K – величина, измеряемая на дифракционной картине от центрального максимума до максимума первого порядка; F – фокусное расстояние объектива дифракционной установки.

Подставляя значение $\sin\varphi_\lambda$ в уравнение (94), получим следующую форму для вычисления длин волн:

$$a + b = 2F\lambda/K. \tag{95}$$

С целью повышения точности на дифракционной картине измеряют не K, а отрезок $2K$ между максимумами первого порядка. Учитывая это и заменяя $a + b$ на d, а $2F$ на $\mathcal{Z}$ – расстояние от исследуемого негатива до экрана установки, где наблюдается или фотографируется дифракционная картина, перепишем формулу (95) в следующем виде:

$$d = 2\mathcal{Z}\lambda/2K = A/2K, \tag{96}$$

где $2\mathcal{Z}\lambda$ является постоянной дифракционной установки.

Величина $2K$ на рис. 24 показана для преобладающих длин волн (между наиболее плотными частями максимумов).

Основными отличиями дифракционных картин волнения от картин, полученных от идеальных решеток, является радиальное и тангенциальное расширение максимумов. При этом максимумы имеют точечную структуру. Расширение максимумов в радиальном направлении соответствует изменению длин волн в пределах сфотографированного участка (линейный спектр волн), а тангенциальное расширение максимумов указывает на то, что по любому направлению распространения волн в пределах угла θ (рис. 24) имеет место периодичность волнения с сохранением неизменности длин волн (угловой спектр волн). Точечная структура максимумов является результатом того, что ветровое волнение состоит из отдельных групп, каждая из которых является как бы самостоятельной дифракционной решеткой, давая при обработке на дифракционной картине свой точечный максимум.

Главным достоинством дифракционного метода обработки аэроснимков волнения является его объективность. Дифракционная картина, полученная от аэроснимка, позволяет быстро и точно получить спектр длин волн для одной или нескольких систем волн, существующих на данном участке, а также направление их распространения.

12.40. Для определения скорости волн используется съемка с большим перекрытием (60–70%) между соседними снимками. По двум перекрывающимся снимкам измеряются расстояния от идентичных волн до какого-либо неподвижного объекта. Разность этих расстояний умножается на знаменатель масштаба съемки и делится на интервал между двумя экспозициями, устанавливаемый по изображениям секундомера на снимках.

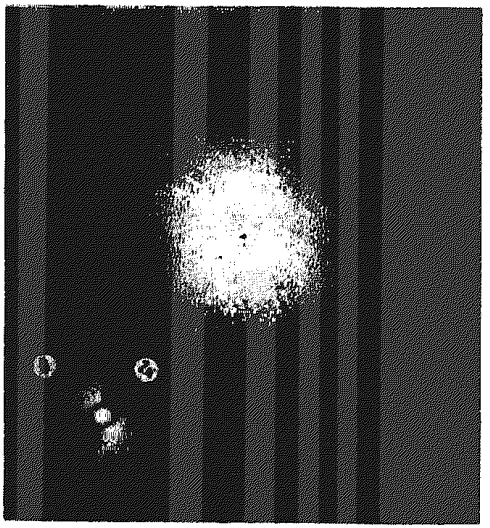


Рис. 24. Аэрофотоснимок зоны бликов на взволнованной водной поверхности (*а*) и дифракционная картина от него (*б*)

В качестве неподвижных объектов в прибрежной или мелководной зоне могут служить местные предметы, искусственные сооружения, контуры дна и т.п. В открытой части водоема в качестве таких объектов можно использовать пятна подкрашенной воды, созданные путем сброса с самолета красителей (например, флюоресцеина).

12.41. Для определения углов наклона отдельных поверхностей волн используются специальные съемки зоны бликов, создаваемые Солнцем или искусственным источником света на взволнованной водной поверхности (рис. 24).

Определение крутизны волн этим методом выполняется графически или аналитически по высоте Солнца h_0, фокусному расстоянию аэрофотоаппарата f и расстоянию r от главной точки О (центра) снимка до блика. Существенно упрощает этот метод применение специальных палеток, позволяющих получать величины углов наклона простым наложением их на снимок. Пример такой палетки дан на рис. 25 для высоты Солнца 55° и различных фокусных расстояний аэрофотоаппарата f.

Палетка накладывается на снимок таким образом, чтобы центр ее совпал с главной точкой снимка, а ось – с направлением на Солнце. Угол α наклона участка поверхности волны, дающего блик, и угол Ψ между направлением на Солнце и проекцией линии падения этого участка находятся путем интерполяции по двум палеткам, отвечающим высотам Солнца h_0, ближайших к данному значению h_0.

Азимут A линии падения участка, давшего блик, определяется по формуле

$$A = A_0 - \Psi,$$

где A_0 – азимут Солнца.

Для определения h_0 и A_0 нужно фиксировать время в момент съемки. Зная время и определив по карте географические координаты точки фотографирования, значения h_0 и A_0 находятся по специальным таблицам[1].

Для вычерчивания на снимке направления на Солнце необходимо в процессе съемки измерить истинный курс самолета A' (азимут его оси симмет-

[1] Шаронов В.В. Таблицы для расчета природной освещенности и видимости. – М.: Изд. АН СССР, 1945. – с. 145.

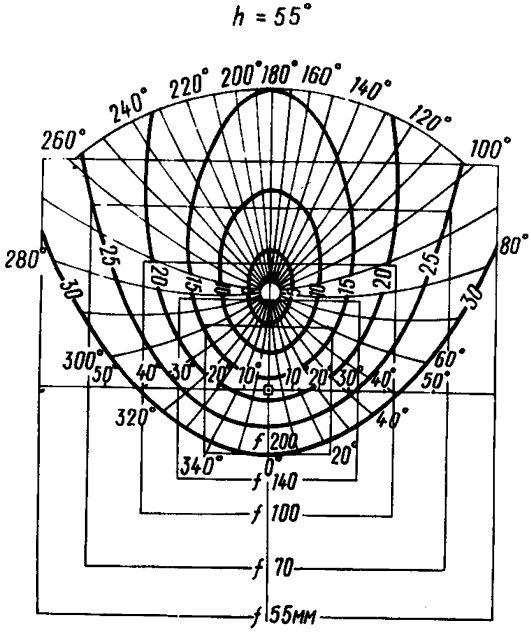


Рис. 25. Палетка для определения углов наклона поверхностей волн

рии). При этом аэрофотоаппарат в самолете должен быть установлен таким образом, чтобы ось симметрии самолета совпадала бы с линией, соединяющей координатные метки, расположенные на противоположных краях снимка. Тогда азимут этой линии будет равен истинному курсу самолета и прочерчивание на снимке направления на Солнце легко выполняется по углу $\theta = A_0 - A'$.

Значения r_0 и θ измеряются непосредственно по снимку.

12.42. Определение высотных характеристик волн по одиночным аэрофотоснимкам невозможно, и это привело к разработке методики воздушной стереофотосъемки волнения, предусматривающей синхронную аэрофотосъемку поверхности водоема двумя аэрофотоаппаратами.

В настоящее время существует два варианта воздушной стереофотосъемки волнения – с одного и с двух самолетов. В первом варианте аэрофотоаппараты устанавливаются в крыльях самолета и работают синхронно от одного командного прибора. Этот вариант более простой, но небольшая длина базиса фотографирования вынуждает вести съемку только в крупном масштабе, с небольших высот.

Во втором варианте аэрофотоаппараты устанавливаются на разных самолетах, а синхронность фотографирования обеспечивается применением специального радиосинхронизатора.

При использовании двух самолетов аэрофотосъемка может выполняться в любом заданном масштабе. Для обработки материалов воздушной стереофотосъемки применяются в основном те же приборы и та же методика, что при обработке стереопар для составления топографических карт; они позволяют получать профили взволнованной поверхности по данным направлениям или вычерчивать планы взволнованной поверхности в горизонталях.

НОМОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ДЛИНЫ МАРШРУТА, ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ АЭРОФОТОСЪЕМКАМИ И ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

На номограмме, изображенной на рис. 26, приняты следующие обозначения:

S – длина маршрута; n – число снимков в маршруте; q – продольное перекрытие снимков; W – скорость течения; Δt – интервал времени между двумя последовательными аэрофотосъемками; $1:m$ – масштаб аэрофотосъемки; ΔL – ошибка определения пути поплавка в натуре, пройденного за интервал времени Δt; M_1 – то же, в масштабе аэрофотосъемки.

Номограмма рассчитана для одиночных маршрутов, прокладываемых между двумя опорными пунктами, и для висячих маршрутов, опирающихся на одном конце на два опорных пункта, и построена для четырех наиболее употребительных масштабов 1:5000, 1:10000, 1:15000, 1:20000 и четырех значений продольного перекрытия снимков в маршруте: q – 60, 70, 75, 80%.

Кривые, вычерченные сплошной линией, относятся к маршрутам, замкнутым между двумя опорными пунктами, а кривые, вычерченные пунктиром, – к висячим маршрутам.

Номограмма рассчитана для наиболее невыгодного случая, когда направление течения совпадает с направлением наибольшей средней квадратической ошибки определения положения поплавков.

Все расчеты выполнены для самого слабого места маршрута, каким является средняя точка для замкнутых маршрутов и конечная точка для висячих маршрутов. Для висячих маршрутов было принято, что расстояние между опорными пунктами равно 100 м, а средняя квадратическая ошибка их взаимного положения составляет ± 1мм.

При задании относительной ошибки скорости течения $\Delta W:W$ при расчетах используется левая часть номограммы, причем расчет можно вести непосредственно для $\Delta W:W \approx 10, 15, 20\%$.

При задании абсолютной ошибки ΔW при расчетах используется правая часть номограммы, причем расчеты можно вести непосредственно для $\Delta W =$ $=0{,}10$; 0,15 и 0,20 узла (1 узел $=$ 5,1 см/с).

Решение с помощью номограммы наиболее часто встречающихся задач пояснено ниже.

Задача 1. Даны: $W, \Delta t, \Delta W:W, 1:m, q$.

Определить: S, n.

Поясним решение задачи первоначально при $\Delta W:W = 20\%$, воспользовавшись схемой, изображенной на рис. 27, и предполагая, что маршрут замкнут между двумя опорными пунктами.

Проводя линию через точки A и B, отвечающие заданным значениям Δt и W, находим точку C на средней шкале ΔL, рассчитанной для $\Delta W:W =$ $= 20\%$. Через точку C проводим прямую, параллельную оси номограммы S, и находим точку D на кривой, отвечающей заданному масштабу аэрофотосъемки. Для висячего маршрута берется точка на соответствующей кривой, вычерченной пунктиром. Через точку D проводим прямую, перпендикулярную оси номограммы S, и находим точку H на шкале, отвечающей заданному значению масштаба $1:m$. В точке H отсчитываем искомое значение допустимой длины маршрута S. Продолжив линию DH, находим точку M на шкале, отвечающей заданному значению q, и в ней отсчитываем искомое число снимков в маршруте.

Если значение $\Delta W:W$ принято равным 10 или 15%, то используется одна из боковых шкал ΔL. Это пояснено на рис. 28 для шкалы ΔL, отвечающей $\Delta W:W = 15\%$. В этом случае, как и ранее, находим на средней шкале

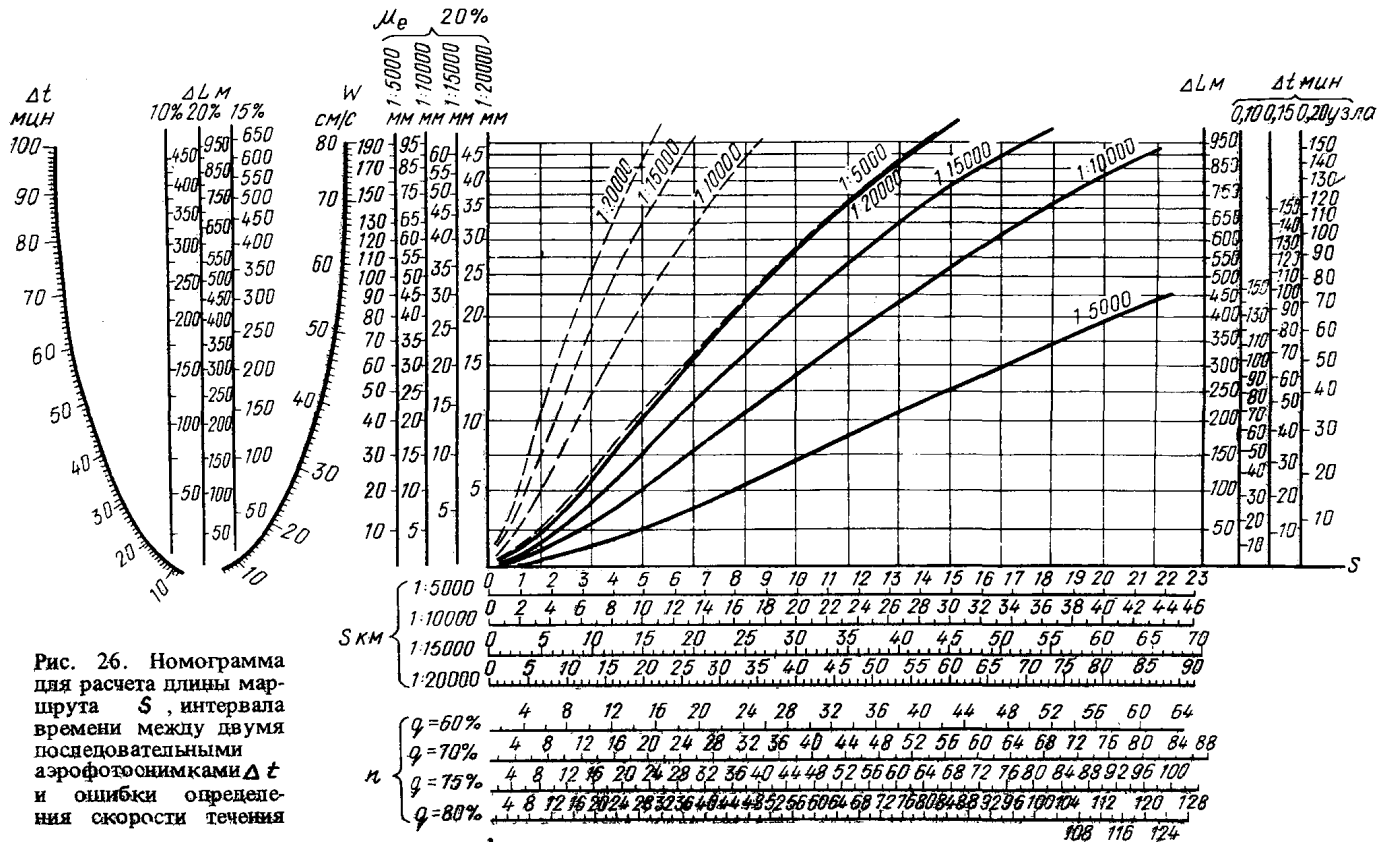


Рис. 26. Номограмма для расчета длины маршрута S, интервала времени между двумя последовательными аэрофотоснимками Δt и ошибки определения скорости течения

точку C, отвечающую заданным значениям Δt и W. Проводим линию CE перпендикулярную шкалам ΔL, и в точке E отсчитываем величину ошибки ΔL. Затем находим на средней шкале точку K отсчет в которой равен отсчету ΔL в точке E, и проводим прямую, параллельную оси номограммы S, определяя точку D. Нахождение точек H и M, фиксирующих искомые значения S и h, выполняется так же, как это пояснено выше.

Задача 2. Дано : $\Delta t, 1:m, \Delta W, q$.
Определить: S, n.

На правой шкале, отвечающей заданному значению ΔW (в узлах), находим точку с отсчетом, равным Δt. Затем проводим линию, параллельную оси номограммы S, и находим точку в пересечении этой линии с кривой, соответствующей заданному масштабу $1:m$. Как и в предыдущей задаче, для замкнутых маршрутов используются кривые, вычерченные сплошной линией, а для висячих маршрутов – кривые, вычерченные пунктиром. Дальнейшее определение искомых значений S и n выполняется так же, как и в задаче 1.

Задача 3. Дано: $S, 1:m, W, \Delta W:W$.
Определить: Δt.

Последовательность решения задачи пояснена на схеме, изображенной на рис. 27. Находим точку N, отвечающую заданным значениям S и $1:m$, и, проведя вертикальную линию, получаем точку T в пересечении с кривой, отвечающей масштабу съемки $1:m$. Затем, проведя горизонтальную линию влево, получаем точку J на средней шкале ΔL. Проведя прямую через точку J и точку О, отвечающую заданному значению W, находим точку P, в которой отсчитываем искомое значение Δt. Это построение соответствует $\Delta W:W$=20%. Если $\Delta W:W$ равно 10 или 15%, то на соответствующей боковой шкале ΔL находится точка E имеющая отсчет, равный отсчету в точке J (рис. 28). Затем через точку E проводится прямая, параллельная оси номограммы S, и в пересечении ее находится на средней шкале точка С. Через C и B проводится прямая, в пересечении которой со шкалой Δt отсчитывается искомое значение Δt.

Задача 4. Даны: $S, 1:m, \Delta W$.
Определить: Δt.

Как и в задаче 3, находим точку T, через которую вправо перечерчивается прямая, параллельная оси номограммы S.

В пересечении этой прямой с соответствующей ΔW (в узлах) вертикальной шкалой Δt отсчитывается искомое значение интервала времени Δt.

Задача 5. Дано: $S, \Delta t, W, 1:m$.
Определить: $\Delta W, W$.

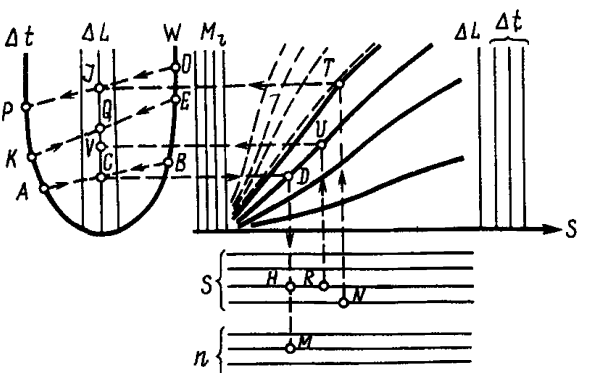


Рис. 27, 28. Схемы, поясняющие пользование номограммой на рис. 26

Находим точку K, отвечающую заданным значениям S и 1: m (рис. 27), и проводим линию KV, перпендикулярную оси номограммы S, определяя точку U. Проведя через точку U линию, параллельную оси S, находим точку V на средней шкале ΔL, в которой берем отсчет ΔL_1. Используя заданные значения W и Δt, находим отвечающие им точки E и K, и проведя через них прямую, определяем точку Q, в которой берем отсчет ΔL_2.

Искомое значение $\Delta W:W$ в процентах определяется по формуле

$$\Delta W: W = 20 \Delta L_1 / \Delta L_2 .$$

Примечание. При аэросъемке течений с применением метода трилатерации также сохраняется описанная выше схема расчетов с использованием номограммы, данной на рис. 26. В этих случаях наибольшая ошибка определения векторов течения также будет в середине маршрута.

При применении метода трилатерации по сравнению с одиночными маршрутами дополнительное влияние на точность результатов оказывает ошибка определения положения узлового поплавка. Однако эта ошибка незначительная, и ввиду приближенного характера расчетов может не учитываться.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

УЧЕТ РЕФРАКЦИИ В ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

1. При геодезических измерениях возникают существенные погрешности из-за преломления световых лучей в земной атмосфере (рефракции), вызываемого закономерным изменением плотности воздуха с высотой. Влияние рефракции особенно значительно при геодезическом (тригонометрическом) нивелировании, что ограничивает применение метода.

Исследования с целью учета влияния вертикальной рефракции развиваются в трех направлениях: методическом, инструментальном и метеорологическом. Методические приемы пока не в состоянии обеспечивать достаточную для практических целей точность. Что касается инструментального направления, то оно не вышло из начальной стадии развития идей и экспериментальной проверки принципиальных возможностей.

Ниже дано краткое изложение теоретических положений, лежащих в основе метеорологического направления решения задачи и получивших развитие в последние годы, а также рассмотрены практические рекомендации по учету рефракции путем введения поправок в результаты нивелирования.

2. Поправка за рефракцию в геодезическом нивелировании определяется известной формулой, предложенной Иорданом в 1876 г., а именно:

$$r = -395 (P/T^2) S^2 (0{,}0342 - \bar{\delta}_t) 10^{-6}, \qquad (97)$$

где P и T – атмосферное давление (мб) и температура воздуха в градусах абсолютной шкалы (K);

S – расстояние между пунктами, м;

$\bar{\delta}_t$ – средний интегральный ("действительный") градиент температуры на пути визирного луча, К/м.

Многократные попытки решения задачи сводились к рассмотрению возможностей использования формулы (97) путем измерения так называемого локального градиента δ_t, вычисляемого на основе того или иного соотношения, имеющего аналогию с выражением вида

$$\gamma_t = T_* / \alpha^0 z, \qquad (98)$$

где T_* – температурный масштаб (K) в теории подобия Обухова-Монина; α^0 – универсальная константа, зависящая от термодинамического состояния атмосферы, близкая к единице; z – высота над подстилающей поверхностью, м.

Экспериментальные исследования показали наличие зависимости между ошибками и поправками, найденными из геодезических и метеорологических измерений. Однако полученная связь оказалась недостаточной для практического использования, в силу чего метеорологический метод учета рефракции в указанном виде успеха не имел.

3. Предлагаемый метод основан на применении теории подобия к задаче о геодезической рефракции. Эта теория широко используется в различных областях физики и ее практических приложениях. Одним из достоинств теории подобия является то обстоятельство, что путем обработки сравнительно ограниченного числа экспериментальных данных удается найти решение, которое представляется возможным распространить на широкий круг подобных явлений.

При экспериментальном изучении рефракции обычно производят измерения коэффициента рефракции, угла рефракции или соответствующей последнему ошибки. Одновременно измеряют на станции температуру воздуха и ее градиент, атмосферное давление, влажность. Это позволяет получить ряд физически однородных и сходственных во времени величин $\bar{\gamma}_z$ и γ_t. Первые могут быть найдены из формулы (97), а для определения вторых удобно воспользоваться разработанной А.Р.Константиновым методикой, согласно которой температурный градиент на высоте 1 м над подстилающей поверхностью может быть рассчитан по формуле

$$\gamma_t = \alpha (T_0 - T_2) / z_1 \ln \frac{200}{z_0'} \text{ км}, \qquad (99)$$

где величины $\Delta T_2 = T_0 - T_2$, α, z_0' определяют на основе показаний аспирационного психрометра, установленного на стандартной высоте метеоизмерений $z_2 = 2$ м, $z_1 = 1$ м.

Можно заметить, что последнее выражение является частным случаем формулы (98).

Если путем метеоизмерений определен ряд из n значений γ_t и одновременно произведены измерения зенитных расстояний на станции на пункты с известными отметками, что позволяет получить nK величины $\bar{\gamma}_z$ (K – число наблюдаемых пунктов на станции), то, допуская существование линейной зависимости между переменными $\bar{\gamma}_z$ и γ_t, можем записать систему линейных функций:

$$\left.\begin{aligned} \bar{\gamma}_{1K} &= C_{1K}\,\gamma_1; \\ \bar{\gamma}_{2K} &= C_{2K}\,\gamma_2; \\ &\cdots\cdots\cdots \\ \bar{\gamma}_{nK} &= C_{nK}\,\gamma_n, \end{aligned}\right\} \qquad (100)$$

где

$$\begin{aligned} C_{1K} &= \bar{\gamma}_{1K}/\gamma_1; \\ C_{2K} &= \bar{\gamma}_{2K}/\gamma_2; \\ &\cdots\cdots\cdots \\ C_{nK} &= \bar{\gamma}_{nK}/\gamma_n \end{aligned}$$

представляют собой коэффициенты подобия (масштабы), позволяющие осуществить переход от одной переменной величины к другой. Или, иными словами, C_γ – числа, которые получаются при измерении величины $\bar{\gamma}_z$ с помощью единиц измерения γ_t.

При соблюдении равенства

$$C_{1K} = C_{2K} \cdots = C_{nK} = 1$$

система имеет тождественное преобразование.

Естественно, что соблюдение последнего условия наиболее вероятно в случае, когда высота визирного луча z приближается к уровню измерения температурного градиента, равному 1 м.

Масштаб C_f представляет собой отношение интенсивностей перепада температур между высотой 1 м и высотой визирного луча z, м. Его можно трактовать как некоторую безразмерную высоту $\bar{z}$, пропорциональную средней высоте визирного луча $z_{ср}$:

$$C_f = \bar{z} = C_t z_{ср},$$

где C_t – некоторый коэффициент пропорциональности.

Составим отношение их сходственных величин $\bar{r}_t$ и r_t, в результате чего получим безразмерный комплекс

$$C = \bar{r}_t \propto z / T_ж = idem, \tag{101}$$

где $idem$ означает "одно и то же". Число C остается одинаковым при подобных преобразованиях в сходственных условиях, то есть при постоянном значении параметра z. С изменением высоты луча (при наблюдениях на другие пункты) число C принимает иные значения.

Умножим числитель и знаменатель выражения (101) на сходственное значение r_1, после чего составим зависимость

$$\bar{r}_1 / \bar{r}_t = z r_1 \cdot \propto / C T_ж \tag{102}$$

или

$$\bar{z} = A z r_1, \tag{103}$$

где A – константа, зависящая от параметра z.

Опыт геодезического нивелирования и результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что влияние рефракции зависит как от средней высоты визирного луча $z_{ср}$ над подстилающей поверхностью, так и от высоты $z_н$ в начальной точке (высоты инструмента). Поэтому исходя из соображения размерности представим параметр z в последнем выражении в виде

$$z = \sqrt{z_н z_{ср}}.$$

Тогда имеем

$$\bar{z} = A (z_н z_{ср})^{0,5} r_1. \tag{104}$$

Выражение (104) может быть положено в основу анализа и обобщения экспериментальных данных с целью получения эмпирических констант, позволяющих осуществить переход от легко доступных для измерения величин $r_1, z_{ср}, z_н$ к искомой переменной $\bar{r}_z$.

Наиболее распространенной формой представления результатов обработки эксперимента является в теории подобия степенная зависимость между определяемым и определяющими критериями подобия:

$$П_x = A П_1^m П_2^n,$$

где A – постоянный коэффициент; m, n – постоянные показатели степени. При этом определяющие критерии составлены из независимых (измеренных) параметров, а в состав определяемого входит искомая переменная величина.

В соответствии с этим обработку экспериментальных данных по изучению рефракции следует производить, согласно (104), в виде

$$\bar{z} = A_1 r_1^n, \tag{105}$$

где

$$A_T = A(z_н z_{ср})^{0,5}. \qquad (106)$$

Показатель степени n определяют с помощью графического представления опытных данных в координатах $\lg \bar{z} = f(\lg \gamma_1)$. Проверкой применимости степенной зависимости (105) является тот факт, что полученные по опытным данным точки укладываются в логарифмических координатах вдоль одной прямой, что позволяет определить n как тангенс угла наклона указанной прямой к оси абсцисс.

Заметим, что отмеченный факт о применимости степенной зависимости (105) подтвержден на обширном экспериментальном материале. При этом обнаруживается четкая связь между величинами $\bar{z}$ и γ_1, полученными по материалам наблюдений при неустойчивой температурной стратификации (дневное время летом), что позволило определить значение n, равное 0,8–0,85. В условиях равновесной или устойчивой стратификации (преимущественно ночью, утром, а также вечером) указанная связь нарушалась, что обусловлено отмеченной выше физической природой параметра $\bar{z}$.

Другая константа определяется из уравнения

$$A_1 = \bar{z}/\gamma_1^n = \gamma_1^{1-n}/\bar{\gamma}_t, \qquad (107)$$

которому удовлетворяет любая точка прямой.

Поскольку искомая величина $\bar{z}$ является функцией двух аргументов, то на графике получаем семейство параллельных прямых. Каждая из этих прямых определяется уравнением (106) при постоянном значении аргумента $(z_н z_{ср})^{0,5}$, что позволяет установить соответствующее значение A_1.

Полученные опытные данные представляют на другом графике в виде зависимости $\lg A_1 = f[\lg(z_н z_{ср})^{0,5}]$, откуда аналогичным образом определяют на этот раз показатель степени m и постоянную А. На основе обработки экспериментальных данных найдены значения: m=1,2 и А=1,14. Отсюда имеем

$$\bar{z} = 1,14(z_н^{0,5} z_{ср}^{0,5})\gamma_1^{0,85}$$

или

$$\bar{\gamma}_t = \gamma_1^{0,15}/1,14(z_н z_{ср})^{0,6}. \qquad (108)$$

Подстановка полученного выражения в (97) позволяет рассчитывать поправки за рефракцию в результаты тригонометрического нивелирования на основе несложных метеоизмерений и легко определяемых величин $z_н$ и $z_{ср}$. При постоянных значениях метеопараметров p = 1000 мб, t = 15°С, γ_1 = 0,1 К/м, соответствующих некоторым "стандартным" условиям атмосферы, формула (97) с учетом (108) принимает вид

$$r = -0,48 S^2[0,0342 - 0,62/(z_н z_{ср})^{0,6}]10^{-6}. \qquad (109)$$

4. Средняя высота визирного луча над подстилающей поверхностью рассчитывается с помощью построенного в удобном масштабе профиля по формуле Симпсона

$$z_{ср} = 1/3n[z_н + z_к + 2(z_2 + z_4 + \ldots + z_{n-2}) + 4(z_1 + z_3 + \ldots + z_{n-1})], \qquad (110)$$

где n – четное число равных отрезков, на которое делится длина линии S; $z_н, z_к$ – высоты начала и конца линии визирования; $z_{1,2\ldots n}$ – измеренные в масштабе профиля высоты визирного луча над подстилающей поверхностью.

5. Для определения градиента γ_1 достаточно, как уже отмечалось, измерить температуру и влажность (упругость водяного пара) на высоте около 2 м. Можно воспользоваться также данными срочных наблюдений этих метеоэлементов на метеостанциях и постах, расположенных в радиусе нескольких десятков километров от района геодезических измерений.

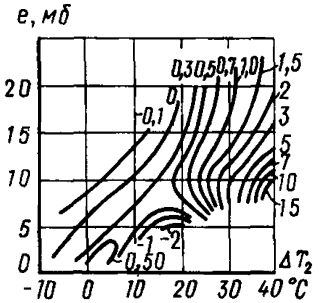


Рис.29. Эмпирическая номограмма для определения температурной разности ΔT_2

Величины ΔT_2, z_0', α, входящие в формулу (99), находят посредством специально составленных номограмм по температуре и влажности воздуха, исправленным поправками за инерционность тепло- и влагообмена в суточном сезонном ходе. Для получения поправок составлены специальные таблицы, куда входят по аргументам T_2 (измеренная температура на высоте 2 м) и дате измерений (число, месяц, время суток).

Множитель α, адекватный α^0 в формуле (98), имеет предел колебаний от 0,9 до 1,1. Поскольку влияние аргументов в формуле (108) на точность определения функции δT_t тем больше, чем выше их показатель степени, то без ущерба можем принять $\alpha = 1$.

Параметр z_0' – коэффициент шероховатости подстилающей поверхности – представляет собой уровень, на котором скорость ветра обращается в нуль. Величина его составляет в общем случае около 4 см и может колебаться в пределах порядка 1–5 см, что при подстановке в (99) дает в знаменателе от 5 до 3,5 безразмерных единиц, в среднем около 4. Числитель ΔT_2, представляющий температурную разность между уровнями t_0' и 200 см, имеет диапазон колебаний в летнее время днем около 0–1,5 К. Следовательно, в крайнем случае ($\Delta T_2 = 1{,}5$ К) при указанных экстремальных значениях знаменателя имеем в расчете на γ_1: 0,3 и 0,42 К – или возводя в степень соответственно 0,83 и 0,87. Таким образом, без значительной потери точности стоящее в знаменателе (99) выражение можем принять для средней полосы СССР в летнее время равным 4.

Разность ΔT_2 снимают на эмпирическом графике (рис. 29) по аргументам

$$T_2' = T_2 + \Delta T + \delta T;$$

$$e_2' = e_2 + \Delta e,$$

где T_2, e_2 – измеренная на высоте 2 м температура (К) и влажность (мб) воздуха. Поправки ΔT, Δe и δT выбирают из таблиц 22, 23, 24 по аргументу T_2 (при наблюдениях с мая по сентябрь). Эти же таблицы на все месяцы года можно найти в монографии[1].

Пример. Девятого июля в 16 ч 55 мин показания аспирационного психрометра по сухому и смоченному термометрам составили 26,6 и 17,4 К, что при атмосферном давлении 748 мм (1000 мб) позволило с помощью психрометрических таблиц найти $e_2 = 13{,}6$ мб. По температуре $T_2 = 26{,}6$ К в табл. 1 находим $\Delta T = -0{,}5$ К, а в табл. 2 – $\Delta e = -0{,}2$ мб. Поправка на 17 ч в табл. 24 равна минус 3,3 К. Исправленные значения температуры и влажности будут: $T_2' = 22{,}8$ К, $e_2' = 13{,}4$ мб. С их помощью на рис. 29 имеем $\Delta T_2 = 0{,}7$ К, что в соответствии с (99) дает $\gamma_1 = 0{,}17$ К/м. Если при измерении в дневное время градиент γ_1 оказался менее 0,01 К/м, то в расчет следует принять последнюю цифру.

6. Рассмотрим примеры расчета поправок. Девятого июля 1981 г. в Подмосковье в 12 ч 15 мин измерено превышение между пунктами, расположен-

---

[1] Константинов А.Р. Испарение в природе. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 532 с.

Таблица 22

Поправки за сезонный ход температуры ΔT в различные декады месяцев

T_s, K	май			июнь			июль			август			сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
35	−0,3	−1,2	−1,6	−1,0	−0,5	−0,3	−1,0	−2,4	−2,9	−4,0	−4,8	−4,8	−4,6	−4,0	−3,4
34	−0,1	−1,0	−1,0	−0,2	0,1	0,2	−0,5	−2,0	−2,8	−4,0	−5,0	−5,0	−4,6	−3,9	−3,4
32	0,6	−0,7	−0,1	0,7	1,0	0,7	−0,2	−1,6	−2,7	−3,8	−5,0	−5,3	−4,7	−4,0	−3,5
30	1,1	1,0	1,1	1,5	1,5	1,0	0,0	−1,3	−2,6	−3,7	−5,0	−5,5	−4,9	−4,1	−3,6
28	1,8	1,8	1,9	2,1	2,0	1,2	0,1	−1,2	−2,5	−3,7	−5,0	−5,9	−5,2	−4,4	−3,8
26	2,3	2,3	2,5	2,5	2,1	1,2	0,1	−1,2	−2,6	−3,8	−5,0	−6,3	−5,6	−4,7	−4,0
24	2,6	3,0	3,0	2,6	2,2	1,3	0,2	−1,3	−2,8	−4,0	−5,1	−7,0	−5,9	−5,0	−4,4
22	2,9	3,3	3,2	2,8	2,2	1,3	0,0	−1,5	−3,2	−4,3	−5,5	−7,5	−7,0	−5,6	−4,8
20	3,0	3,4	3,5	3,0	2,3	1,3	0,0	−2,0	−3,6	−4,8	−5,9	−8,3	−8,0	−6,1	−5,4
18	3,1	3,6	3,9	3,3	2,5	1,4	−0,1	−2,5	−4,5	−5,7	−7,0	−9,4	−9,0	−7,1	−6,0
16	3,1	3,7	4,1	3,7	2,7	1,5	−0,4	−3,5	−5,7	−7,0	−8,4	−10,7	−10,5	−8,5	−7,1
14	3,0	3,7	4,3	4,2	2,7	1,5	−0,5	−4,2	−6,7	−8,4	−10,0	−12,5	−11,9	−10,4	−8,6
12	2,9	3,5	4,2	4,4	3,0	1,6	−0,7	−4,5	−7,8	−10,0	−12,8	−14,6	−13,9	−12,4	−10,5
10	2,6	3,3	3,9	4,3	3,5	1,7	−0,7	−4,5	−8,4	−11,5	−15,0	−18,0	−16,6	−15,0	−12,5
8	2,3	3,1	3,5	3,9	3,9	1,6	−0,6	−4,5	−8,6	−12,5	−17,2	−21,5	−20,5	−18,0	−15,0
6	2,0	2,7	3,1	3,3	3,5	1,5	−0,6	−4,5	−8,8	−12,8	−18,0	−23,0	−25,3	−22,0	−17,5
4	1,8	2,2	2,6	2,6	2,9	1,3	−0,6	−4,4	−8,7	−13,0	−18,0	−23,7	−28,8	−29,0	−21,5
2	1,6	1,8	2,0	1,9	2,2	1,0	−0,7	−4,3	−8,6	−13,0	−18,0	−23,9	−29,9	−34,0	−26,0
0	1,2	1,4	1,4	1,3	1,6	0,4	−0,8	−4,0	−8,6	−12,5	−17,5	−23,9	−30,0	−37,0	−30,0

Таблица 23

Поправки за сезонный ход влажности Δe в различные декады месяцев

T, K	май			июнь			июль			август			сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
35				−0,8	−2,0	−2,0	−0,4	0,5	1,0	−0,5					
34			0,2	−0,5	−1,7	−1,8	−0,6	0,6	0,9	−0,5					
32	1,6	0,9	0,3	−0,4	−1,5	−1,0	−0,3	0,6	0,5	−0,6	−1,3	−1,9	−1,9	−1,3	
30	1,8	1,3	0,6	−0,2	−1,2	−0,9	−0,3	0,5	0,3	−0,6	−1,4	−2,1	−2,0	−1,5	−1,1
28	2,3	1,6	0,8	−0,1	−0,8	−0,7	−0,3	0,3	0,1	−0,7	−1,7	−2,3	−2,0	−1,7	−1,3
26	3,5	1,8	1,2	0,4	−0,4	−0,6	−0,4	0,0	−0,2	−1,0	−2,0	−2,5	−2,2	−1,8	−1,5
24	4,0	3,0	1,7	0,8	−0,1	−0,5	−0,5	−0,7	−0,7	−1,4	−2,3	−2,7	−2,4	−2,0	−1,7
22	3,3	4,0	2,6	1,4	0,0	−0,3	−0,6	−0,2	−1,3	−2,0	−2,7	−3,0	−2,6	−2,2	−1,8
20	2,6	4,0	3,6	2,0	0,7	−0,4	−1,0	−1,4	−1,9	−2,7	−3,2	−3,4	−2,9	−2,4	−2,0
18	2,2	3,4	4,0	2,9	1,4	−0,3	−1,4	−2,0	−2,8	−3,5	−3,9	−3,8	−3,2	−2,6	−2,2
16	1,9	3,0	4,0	3,5	2,0	−0,1	−1,8	−3,0	−3,9	−4,4	−4,6	−4,3	−3,6	−2,9	−2,5
14	1,8	2,5	3,4	3,6	2,7	0,2	−2,3	−4,2	−5,0	−5,4	−5,4	−4,8	−4,0	−3,3	−2,8
12	1,6	2,1	2,9	3,3	3,1	0,7	−2,4	−5,0	−6,1	−6,4	−6,2	−5,3	−4,5	−3,8	−3,2
10	1,3	1,8	2,3	2,7	2,6	0,7	−2,5	−5,6	−6,8	−7,8	−7,2	−6,0	−5,1	−4,3	−3,7
8	1,0	1,5	1,7	1,9	1,7	0,3	−2,6	−5,7	−7,2	−8,2	−8,2	−6,9	−5,7	−4,9	−4,3
6	0,8	1,0	1,1	1,1	0,8	−0,2	−2,7	−5,7	−7,3	−8,5	−9,0	−7,7	−6,4	−5,4	−4,7
4	0,6	0,7	0,5	0,3	0,0							−8,1	−7,0	−5,9	−5,0
2	0,4	0,2	0,0										−7,3	−5,9	−4,8
0	0,1	0,0												−5,7	−4,6

Таблица 24

Поправки за суточный ход температуры воздуха δT

T К	1 ч	7 ч	13 ч	19 ч
35	−1,0	2,4	−0,2	−6,2
34	−1,0	2,4	−0,2	−6,0
32	−1,0	2,4	−0,2	−5,8
30	−1,0	2,4	−0,2	−5,5
28	−1,0	2,4	0,0	−5,2
26	−1,0	2,4	0,0	−4,9
24	−1,0	2,2	0,0	−4,7
22	−0,9	2,0	0,1	−4,4
20	−0,8	1,8	0,1	−4,1
18	−0,8	1,6	0,1	−3,9
16	−0,7	1,4	0,1	−3,6
14	−0,6	1,2	0,2	−3,3
12	−0,6	1,1	0,2	−3,0
10	−0,6	1,0	0,2	−2,7
8	−0,5	0,8	0,2	−2,4
6	−0,5	0,6	0,2	−2,0
4	−0,4	0,5	0,2	−1,8
2	−0,4	0,4	0,2	−1,6
0	−0,3	0,3	0,2	−1,3

ными на расстоянии 1952,5 м. Путем метеоизмерений получили $T_2 = 28{,}8$ К, $e_2 = 16{,}6$ мб, $p = 1016$ мб, что позволило определить $\gamma_1 = 0{,}1$ К/м. Расчетом по формуле (110) нашли $z_{ср} = 5{,}4$ м. Наблюдения производились со штатива ($z_н \sim 1{,}5$ м). Подстановка в формулу (108) дает $\gamma_t = 0{,}1770$ К/м. С учетом указанных значений T_2, p и γ_t на основании (1) имеем $r = -0{,}249$ м. Расчет по упрощенной формуле (109) дает $r = -0{,}261$ м.

Можно заметить, что измерения производились на испытательном полигоне. Средняя квадратическая погрешность определения поправки на этой линии составила 3,5 см.

Исходные данные для расчета поправок в следующем примере заимствованы из статьи Г.П.Райзмана (Геодезия и картография, № 6, 1966, с. 9–13), где представлены результаты измерений вызванных рефракцией систематических погрешностей, а также данные метеоизмерений температуры, давления и влажности воздуха на 6 мая с указанием сроков снятия отсчетов. Геодезические наблюдения производились с тура ($z_н \sim 1{,}5$ м) на четыре пункта, удаленных на расстояния 11133, 6204, 3898 и 1491 м. По каждому направлению указаны профили линий, что позволило нам вычислить высоты визирного луча $z_{ср}$, соответственно составившие 112, 54, 21 и 15 м. Исследования производились в Средней Азии вблизи Ташкента.

Итак, 6 мая в 15 ч 57 мин показания температуры по сухому и смоченному термометрам аспирационного психрометра составили 27,3 и 18,7 К, атмосферное давление 717,2 мм (956 мб). Это позволило выбрать из психрометрических таблиц $e_2 = 16{,}0$ мб. Из табл. 22 по аргументу $T_2 = 27{,}3$ К на 6 мая (середина декады) находим $\Delta T = 2{,}0$ К. Аналогичным образом из табл. 23 выбираем $\Delta e_2 = 2{,}7$ мб. Из табл. 24 путем интерполяции на 16 ч находим $\delta T = -2{,}6$ К. Исправленные поправками значения $T_2' = 26{,}7$ К и $e_2' = 18{,}7$ мб. Это позволяет с помощью эмпирического графика на рис. 29 найти $\Delta T_2 = 0{,}7$ К. Поделив последнюю цифру на 4, имеем $\gamma_1 = 0{,}17$ К/м. Теперь остается подставить исходные данные в формулы (97) и (108). Расчет дает следующие значения поправок: минус 19, 22, 32, 7 см, которые следует ввести в превышения, указанные в порядке убывания расстояний до наблюдаемых пунктов. Расчет поправок без учета метеоданных по

формуле (109) приводит к следующим результатам: минус 33, 19, 32, 9 см. Заметим, что соответствующие величины, полученные из геодезических измерений (ошибки), оказались равными: 21, минус 20, минус 29, минус 13 см.

Аналогичные по сходимости результаты получаются и в другие сроки наблюдений, кроме утренних (8 ч) и вечерних (20 ч).

7. Экспериментальные исследования показали, что точность определения поправок ухудшается в период ночных инверсий температуры, а в дневное время – с наступлением грозы и во время дождя. В том случае, если визирный луч проходит на начальном участке значительной протяженности вблизи верхнего уровня слоя автоконвекции, точность расчета поправок также снижается. Указанный слой (в пределах которого коэффициент рефракции принимает отрицательное значение) образуется в летнее время днем и простирается до высоты $\sim$ 17 м над подстилающей поверхностью. Высоту его можно оценить по эмпирической формуле

$$z^0 = 23 f_1^{0,15}.$$

В том случае, если в наблюдаемом направлении высота луча $z_{ср}$ близка к z_0, вызванные рефракцией ошибки становятся по абсолютной величине сравнительно небольшими. Однако они принимают обычно скачкообразные изменения во времени, нередко меняют при этом знак и расчет поправок становится затруднительным.

Несмотря на отмеченные ограничения, результаты экспериментальной проверки и производственных испытаний показали, что предложенный метод является эффективным и в то же время достаточно простым и надежным средством повышения точности геодезического нивелирования, не требующим для своего применения существенного увеличения трудовых и материальных затрат. Результаты исследований метода опубликованы в периодических изданиях по геодезии как в СССР, так и за рубежом.

8. В ходе геодезического нивелирования превышения определяют, как правило, из двусторонних неодновременных измерений. В превышения входит при этом погрешность, равная полуразности вызванных рефракцией ошибок, полученных в прямом и обратном направлениях. Минимального значения результирующей погрешности можно ожидать в случае одновременного двустороннего нивелирования и при одинаковой высоте инструментов относительно подстилающей поверхности. Указанные условия не являются типичными в практике нивелирования. Предложенная методика позволяет ослабить влияние того и другого факторов, что ведет к уменьшению результирующей погрешности.

9. В соответствии с (97), точность определения поправки пропорциональна квадрату расстояния до наблюдаемого пункта. Если превышения передавать методом из середины (через точку), то в превышение войдет ошибка, пропорциональная лишь разности квадратов сторон при измерении "назад" и "вперед". При равенстве "плеч", как это имеет место в геометрическом нивелировании, происходит наиболее полная компенсация вызванных рефракцией ошибок. В ходах геодезического нивелирования равенство сторон, естественно, не соблюдается. Поэтому при вычислении превышений методом из середины в полученный результат следует ввести поправку, равную разности поправок, рассчитанных по приведенным выше формулам (97) и (108) для "заднего" и "переднего" направлений.

Решение задачи о геодезической рефракции выше изложенным методом основано на использовании эмпирических констант, полученных из обработки материалов эксперимента, выполняемой на основе теории подобия. Рассмотренный порядок определения этих констант открывает возможности для их независимого определения и уточнения, что будет способствовать углублению физических представлений о влиянии рефракции в геодезических измерениях, освоению и практическому использованию метода.

МЕТОД ПРОГНОЗА ВЕТРОВОЛНОВОЙ АБРАЗИИ БЕРЕГОВ

1. Определение величины размыва берега в условиях значительных колебаний уровня воды в водохранилище в безледное время производится по формуле

$$Q = (T K l / \gamma K_A)(N_B / l_B^2 - N_C / l_C^2), \qquad (111)$$

где Q – объем размыва берега, м^3 на 1 м длины берега за период T, исчисляемый количеством безледных сезонов (лет); N_B и N_C – нормальная составляющая суммарной энергии волн, подходящих к отмели соответственно при редких высоких и при частых уровнях воды, Дж/год (кгс·м/год) на 1 м длины берега; γ – удельный вес слагающих берег пород с учетом взвешивающего влияния воды, Н/м^3 (кгс/м^3); l_B и l_C – средняя за период T ширина отмели по горизонтали в метрах соответственно при среднем из редких высоких и при среднем из частых уровнях воды; $l = 0{,}06$ м – эмпирическая постоянная величина; K – коэффициент размываемости пород; K_A – доля размываемых пород, уносимых на свал прибрежной отмели и в открытую часть водоема.

Удельный вес пород с учетом взвешивающего влияния воды вычисляется по формуле

$$\gamma = (\gamma_Ч - 9810)(\gamma_C / \gamma_Ч), \qquad (112)$$

где $\gamma_Ч$ и γ_C – удельный вес частиц породы и сухой породы.

Коэффициент K применяется в соответствии с табл. 25. В случае неоднородности строения берега среднее значение K вычисляется с учетом мощности слагающих пород.

Таблица 25

Значения коэффициента размываемости K различных пород

Литологическая характеристика и возраст пород		K
Мелко-тонкозернистый песок	(aQ)	1,00
Крупнозернистый песок	(aQ)	0,38
Суглинок	(dQ)	0,20
Суглинок с валунами	(gQ)	0,14
Глины и мергели	($b;Q$)	0,10

Для определения коэффициента K_A рекомендуются следующие формулы. При коротком вдольбереговом потоке наносов (обычно в условиях извилистой береговой черты) расчет K_A следует производить по формуле

$$K_A = N_Н / N, \qquad (113)$$

где N и $N_Н$ – соответственно вся суммарная энергия волн, подходящих к отмели, и нормальная ее составляющая, Дж/год (кгс·м/год) на 1 м длины берега.

При дефиците вдольбереговых наносов для начала сравнительно длинного их потока, формирующегося в условиях выровненной береговой черты, K_A вычисляется из выражения

$$K_A = 2N_н/(N + N_н + N_п), \qquad (114)$$

где $N_п$ – суммарная энергия подходящих к отмели волн, определяющая вдольбереговой поток наносов, Дж/год (кгс·м/год) на 1 м длины берега.

Для зоны транзита вдольбереговых наносов при сравнительно длинном их потоке расчет K_A следует выполнять по формуле

$$K_A = N_н/(N_н + N_п), \qquad (115)$$

2. Расчеты волноэнергетических характеристик, необходимые для прогноза ВВАБ, производятся с учетом главы СНиП по нагрузкам и воздействиям на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) и прил.1 "Руководства по определению нагрузок и воздействию на гидротехнические сооружения" (Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.), по предлагаемой ниже методике.

Исходными материалами для расчета служат карта глубин водоема, таблица повторяемости и обеспеченности уровня воды в водоеме в процентах с разбивкой амплитуды его колебания на интервалы через 0,4 м* за безледный сезон, составленная по многолетним наблюдениям на ближайших водомерных постах или полученная расчетным путем (проектные данные), и таблица продолжительности действия ветра в сутках по 8 основным направлениям и по интервалам скорости ветра (не более чем через 4 м/с) за безледный сезон, составленная по многолетним (не менее 10 лет) наблюдениям на ближайшей метеостанции. Ветры со скоростью менее 3 м/с во внимание не принимаются. Расчеты выполняются для точки, намечаемой на внешнем краю прибрежной отмели.

Методика расчетов элементов волн зависит от того, находится ли рассматриваемая акватория в глубоководной или мелководной зоне водоема. К глубоководной зоне, согласно главы СНиП Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), относится та часть акватории, где глубины составляют более половины средней длины волны и, следовательно, дно не влияет на основные характеристики волн.

В условиях глубоководной зоны от точки расчета проводятся волнообразующие направления через 22,5° до подветренного берега и по каждому из них измеряется длина разгона волн в метрах. Для основных волнообразующих направлений (через 45°), которых в зависимости от конфигурации береговой черты бывает от 3 до 5, устанавливается степень сложности этой конфигурации. Согласно Руководству**, если $L_ф / L_к \geq 2$, где $L_ф$ и $L_к$ – соответственно наибольший и наименьший лучи, проведенные из расчетной точки в секторе ±45° от направления ветра до пересечения с подветренным берегом, то конфигурация считается сложной.

В этом случае при расчетах элементов волн вычисляется эквивалентный разгон D_p по формуле (33). Для основных волнообразующих направлений, составляющих с береговой чертой угол $< 22,5°$, эквивалентный разгон рассчитывается по формуле

$$D_p = 0,27\,(D_0 + 0,85\,D_1 + 0,5\,D_2). \qquad (116)$$

Препятствия с угловым размером $< 22,5°$ при расчетах не учитываются.

В соответствии с главой СНиП по Нагрузкам и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) для каждого из основных волнообразующих направлений для средней скорости ветра W в каждом интервале, вычисленной с поправкой на высоту над поверхностью воды K_z и способ измерения ветра $K_ф$ (табл. 7), производится расчет средних размеров волн (высоты $\bar{h}$, длины $\bar{\lambda}$, периода $\bar{\tau}$ и отношения $\bar{\lambda}/\bar{h}$).

---

* Для водохранилища с многолетним регулированием стока интервалы уровня воды следует увеличить до 0,8 м.

** Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения. – Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.

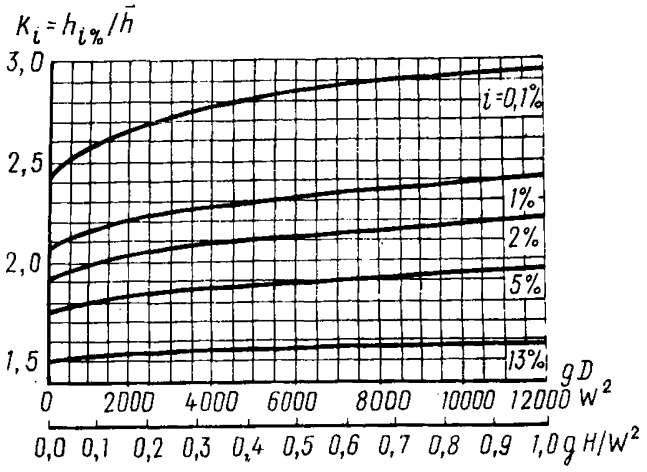


Рис. 30. Графики значений коэффициента K_i

С помощью графиков (рис.30) на основании безразмерной величины gD/W^2 вычисляется $\bar{h}$ и $\bar{\tau}$. Для определения средней длины волны применяется формула

$$\bar{\lambda} = 1{,}56\bar{\tau}^2. \qquad (117)$$

Скорость ветра вдоль линии разгона волн принимается постоянной.

Следующая операция заключается в определении по графикам (рис. 30) для безразмерной величины gD/W^2 значений коэффициента K_i, позволяющих перейти от средней высоты волны к высотам волн обеспеченностью 0,1; 1; 2; 5 и 13% в гамме. По полученным значениям K_i строится на клетчатке вероятностей Бровковича кривая обеспеченности этого коэффициента от 0,01 до 13%. Кривая экстраполируется до величины K_i, имеющей обеспеченность 99,9%. По такой кривой можно определить K_i любой заданной обеспеченности и вычислить соответствующие высоты волн, умножая среднюю высоту волны на значения коэффициента K_i. Пример построения кривой обеспеченности K_i показан на рис. 31.

Далее на клетчатке вероятностей Хазена (с нормальным масштабом по вертикальной оси) строится кривая обеспеченности высот волн от 0,1 до 99,9%, с помощью которой можно установить повторяемость P_j высот волн в любом заданном интервале (рис. 32). Значение интервала целесообразно принять равным 0,1 м. Для каждого интервала высот волн вычисляются средние значения высоты h_j, длины λ_j и периода τ_j волны. Расчет производится по формулам:

$$\lambda_j = h_j\bar{\lambda}/\bar{h}; \qquad (118)$$

$$\tau_j = 0{,}8\sqrt{\lambda_j}. \qquad (119)$$

Энергия гаммы волн (в килоджоулях на 1 м их фронта при заданной продолжительности ветра t в сутках) вычисляется следующим образом:

$$n_r = \left(\sum^{m} h_j^2 \lambda_j P_j / \sum^{m} \tau_j P_j\right) \gamma_в t \cdot 10800, \qquad (120)$$

где $\gamma_в$ — удельный вес воды, равный 9,81 кН/м^3 (1 тс/м^3); m — количество интервалов высот волн.

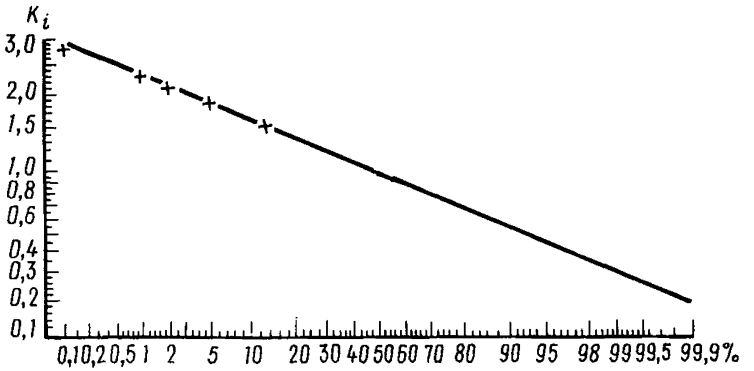


Рис. 31. Кривая обеспеченности коэффициента K_i

При наличии мелководий расчет средних параметров волн и высот волн обеспеченностью 0,1; 1; 2; 5 и 13% в гамме для заданной скорости и направления ветра производится согласно главе СНиП по проектированию нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). В остальном методика вычисления энергии гаммы волн та же, что и для глубоководных зон.

Для глубоководной зоны построены вспомогательные графики зависимости $\bar{h} = f(W)$ и $n_r = f(\bar{h})$ при продолжительности ветра в сутки и различных разгонах волн (рис. 33 и 34). Пользование этими графиками значительно ускоряет расчеты энергии гаммы волн, так как требуется предварительно определить лишь скорость ветра и длину разгона волн.

На основании величин n_r, полученных по основным волнообразующим направлениям для расчетных скоростей ветра с учетом их продолжительности, производится определение суммарных волноэнергетических характеристик за безледный сезон. Ход вычислений понятен из табл. 26.

Вначале определяются величины энергии волн n по каждому волнообразующему направлению, приходящиеся на 1 м длины фронта волн. Затем производится перерасчет этих величин на 1 м длины берега путем умножения на синус угла подхода волн к берегу. В качестве такового угла принимается наименьший угол по отношению к одной из сторон "угла раскрытия берега" (рис. 35). Угол раскрытия берега, по В.В.Дмитриеву, заключен между двумя радиусами окружности. Центр окружности помещается

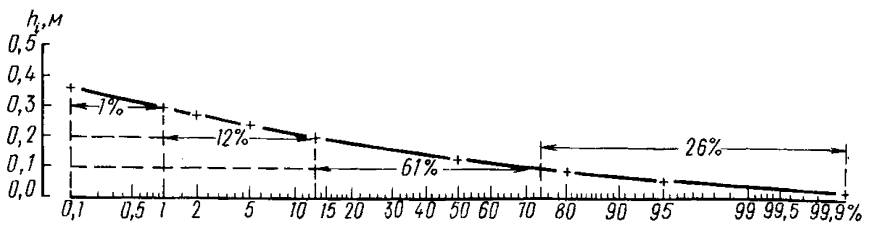


Рис. 32. Кривая обеспеченности высот волн в гамме

Таблица 26

Пример расчета суммарных волноэнергетических характеристик при постоянном уровне воды

Интервалы скорости ветра, м/с	Средняя скорость ветра в интервале с учетом поправок K и K_φ, м/с	Волнообразующие направления					
		северное			северо-восточное		
		высота волн $\bar{h}$, м	продолжительность ветра в сутки, t	энергия волн n_Γ, кДж (тс·м)	высота волн $\bar{h}$, м	продолжительность ветра в сутки, t	энергия волн n_Γ, кДж (тс·м)
3–5	4,0	0,09	5,50	20368 (2077)	0,13	2,33	19907 (2030)
6–8	6,9	0,17	7,83	111394 (11359)	0,26	3,33	144148 (14699)
9–11	9,9	0,27	4,67	194397 (19823)	0,40	1,83	216217 (22048)
12–14	12,1	0,33	0,50	32264 (3290)	0,49	0,17	32666 (3331)
18–20	16,2						
Энергия волн по отдельным направлениям n				358423 (36549)			412938 (42108)
Угол между линией разгона волн и берегом β				45°			90°
$n \cdot \sin\beta$				253443 (25840)			412938 (42108)
Суммарная энергия волн $N_i = \Sigma n \cdot \sin\beta$				1035748 кДж / год на 1 м длины берега (105609 тс·м/год)			
$n \sin\beta \cos^2\beta$				125961 (12841)			0
Продольная составляющая суммарной энергии волн $N_{S_i} = \Sigma n \cdot \sin\beta \cdot \cos^2\beta$				334321 кДж / год на 1 м длины берега (34084 тс·м/год)			
Нормальная составляющая суммарной энергии волн $N_{H_i} = N_i - N_{S_i}$				701427 кДж / год на 1 м длины берега (71525 тс·м/год)			
Суммарная энергия волн, определяющая вдольбереговой поток наносов N_{n_i}				−208360 + 125961=82399 кДж/год на 1 м длины берега (−21243 + 12841= =−8402 тс·м/год)			

Продолжение табл. 26

Интервалы скорости ветра, м/с	Средняя скорость ветра в интервале с учетом поправок K и K_φ, м/с	Волнообразующие направления					
		восточное			юго-восточное		
		высота волн $\bar{h}$, м	продолжительность ветра в сутки, t	энергия волн n_r, кДж (тс·м)	высота волн $\bar{h}$, м	продолжительность ветра в сутки, t	энергия волн n_r, кДж (тс·м)
3–5	4,0	0,15	1,33	16897 (1723)	0,12	14,33	102842 (10487)
6–8	6,9	0,31	1,83	127761 (13028)	0,23	8,17	257611 (26269)
9–11	9,9	0,47	0,33	60046 (6123)	0,36	2,17	193328 (19714)
12–14	12,1						
18–20	16,2				0,64	0,17	60860 (6206)
Энергия волн по отдельным направлениям n				204704 (20874)			614641 (62676)
Угол между линией разгона волн и берегом β				$62^\circ 45'$			$17^\circ 45'$
$n \sin\beta$				181985 (18557)			187382 (19104)

Суммарная энергия волн $N_i = \Sigma n \sin\beta$ 1035748 кДж/год на 1 м длины берега (105609 тс·м/год)

$n \sin\beta \cos^2\beta$ −38217 (−3897) −170143 (−17346)

Продольная составляющая суммарной энергии волн $N_{S_i} = \Sigma n \cdot \sin\beta \cos^2\beta$ 334321 кДж/год на 1 м длины берега (34084 тс·м/год)

Нормальная составляющая суммарной энергии волн $N_{H_i} = N_i - N_{S_i}$ 701427 кДж/год на 1 м длины берега (71525 тс·м/год)

Суммарная энергия волн, определяющая вдольбереговой поток наносов N_{n_i} −208360 + 125961 = −82399 кДж/год на 1 м длины берега (−21243 + 12841 = −8402 тс·м/год)

Примечание. Знак минус означает, что поток наносов направлен против течения реки.

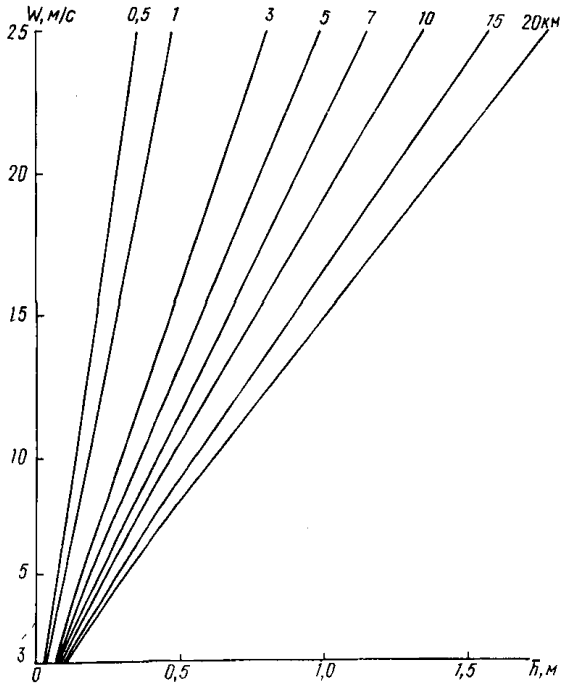


Рис. 33. Графики зависимости $\bar{h} = f(w)$ при различных разгонах волн

точку пересечения створа, для которого выполняются расчеты энергии, и береговой черты. Радиусы длиной не более 500 м соединяют центр окружности и точку пересечения окружности с общим направлением береговой черты (рис. 35).

Сложив величины энергии волн n по отдельным направлениям, получим суммарную энергию волн N_i на 1 м длины берега.

Продольная составляющая суммарной энергии волн на 1 м длины берега вычисляется по формуле

$$N_{S_i} = 0{,}5 \Sigma n \sin \beta \cos^2 \beta. \qquad (121)$$

Нормальная составляющая суммарной энергии волн на 1 м длины берега определяется из выражения

$$N_{H_i} = N_i - N_{S_i}. \qquad (122)$$

Разность между суммарной продольной составляющей энергии волн в одном и другом направлении вдоль берега N_{n_i} (табл. 26) позволяет судить о направлении и интенсивности вдольберегового потока наносов.

Изложенная методика дает возможность рассчитать различные суммарные волноэнергетические характеристики при постоянном уровне воды в водоеме.

Для того чтобы учесть влияние колебаний уровня воды, расчеты суммарных волноэнергетических характеристик выполняются при крайних значениях уровня воды в безледное время. В случае мелководий аналогичные вычисления производятся еще для нескольких промежуточных

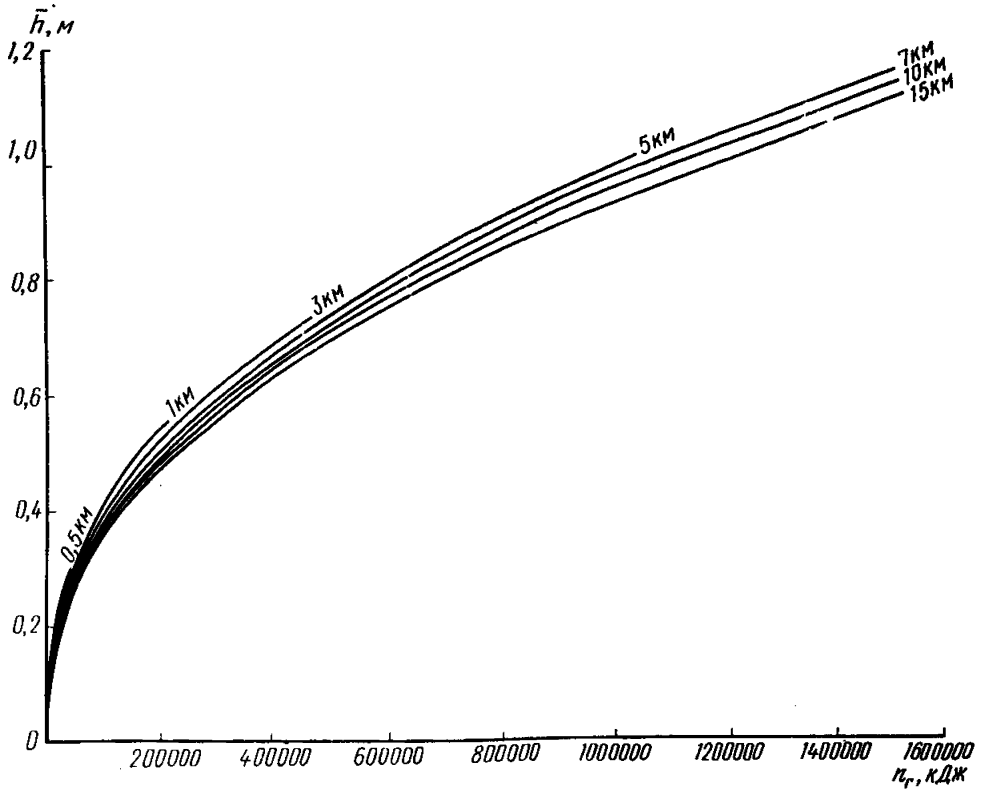


Рис. 34. Графики зависимости $n_r = f(\bar{h})$ при продолжительности действия ветра в сутки и различных разгонах волн

положений. уровня воды. Затем строятся вспомогательные графики зависимости волноэнергетических характеристик от уровня воды. Пользуясь ими, можно определить значение той или иной суммарной волноэнергетической характеристики с учетом повторяемости различных уровней воды за безледный сезон. Например, расчет суммарной энергии ветровых волн N в этом случае следует производить по формуле

$$N=(N_1P_1+\ldots+N_iP_i+\ldots+N_nP_n)/100, \qquad (123)$$

где $N_1 \ldots N_i \ldots N_n$ – величины суммарной энергии волн, рассчитанные при разных положениях уровня воды; $P_1 \ldots P_i \ldots P_n$ – повторяемости этих же уровней в безледное время (%). Аналогично производятся расчеты и других волноэнергетических характеристик, в том числе значений $N_в$ и N_c, необходимых при расчетах по основной формуле (111).

При этом разделение уровней воды в водохранилище на редкие высокие, частые средние и редкие низкие производится на основании анализа данных о повторяемости уровней воды по интервалам.

К частым средним относятся уровни, имеющие наибольшую повторяемость в интервале и повторяемость не менее половины от наибольшей в смежных интервалах, а уровни, располагающиеся выше и ниже этих интервалов, – соответственно к высоким и низким.

В случае закономерного совпадения периода высокого стояния уровней воды с периодом активной деятельности ветра следует выделять интервал высоких уровней воды даже в этом случае, если, согласно указанному

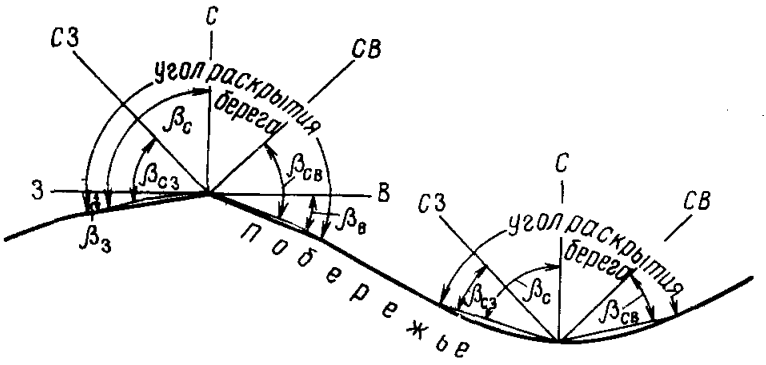


Рис. 35. Схема определения угла подхода волн к берегу

выше приему, он не должен быть. К высоким уровням при этом относятся средние уровни, приходящиеся наполовину верхнего их интервала. Следует рекомендовать также во всех случаях обязательное выделение высоких уровней воды при долгосрочном прогнозе ВВАБ.

3. Для определения начальной ширины отмели по горизонтали $l_{в_0}$ и $l_{с_0}$ при среднем из редких высоких и при среднем из частых уровнях воды (рис. 36) требуется рассчитать первоначально глубину на внешнем краю отмели $H_в$ и $H_с$ и начальную высоту наката волны $H'_в$ и $H'_с$ соответственно при тех же уровнях воды:

$$H_в = 4{,}5\, h_в \qquad (124)$$

и

$$H_с = 4{,}5 h_с \quad , \qquad (125)$$

где $h_в$ и $h_с$ – средняя высота волн соответственно при среднем из редких высоких и при среднем из частых уровнях воды, определяемая по вспомо-

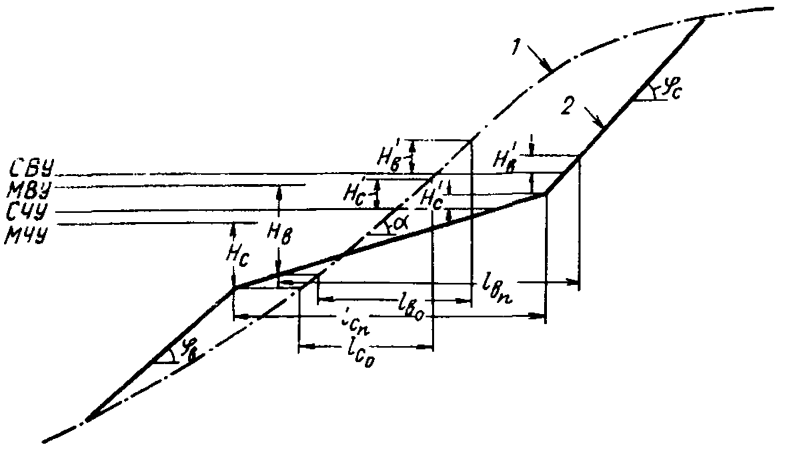


Рис. 36. Схема построения прогнозного профиля берега
1 – начальное положение берегового склона; 2 – профиль берега на конец периода T ; МВУ, СВУ – минимальный и средний из высоких уровни воды; МЧУ, СЧУ – минимальный и средний из частых уровней воды

гательному графику $h = f(H)$. $H_в$ и $H_с$ откладываются соответственно от минимального уровня из редких высоких (МВУ) и минимального уровня из частых (МЧУ).

Высота волны h при том или ином уровне воды H для построения графика вычисляется следующим образцом. Из таблицы расчета суммарных волноэнергетических характеристик при заданном уровне воды выписываются в порядке возрастания высоты волн независимо от волнообразующего направления и соответствующие им величины энергии n. Затем производится последовательное сложение величин энергии нарастающим итогом. Высота волны $\bar{h}$, которой соответствует половина всей суммы этой энергии, принимается за искомую величину h при данном уровне воды H. Пример расчета h приведен в табл. 27.

Таблица 27

Пример расчета средней высоты h при постоянном уровне воды

Высота волны $\bar{h}$ в порядке увеличения по всем волнообразующим направлениям, м	Соответствующая высоте h и продолжительности ветра t энергия волн $n_г$, кДж (тс·м)	Величина энергии волн, полученная последовательным сложением величин $n_г$, кДж (тс·м)
0,09	20368 (2077)	20368 (2077)
0,12	102842 (10487)	123210 (12564)
0,13	19907 (2030)	143117 (14594)
0,15	16897 (1723)	160014 (16317)
0,17	111394 (11359)	271408 (27676)
0,23	257611 (26269)	529019 (53945)
0,26	144148 (14699)	673167 (68644)
0,27	194397 (19823)	867564 (88467)
0,31	127761 (13028)	995325 (101495)
0,33	32264 (3290)	1027589 (104785)
0,36	193328 (19714)	1220917 (124499)
0,40	216217 (22048)	1437134 (146547)
0,47	60046 (6123)	1497180 (152670)
0,49	32666 (3331)	1529846 (156001)
0,64	60860 (6206)	1590706 (162207)

Примечание. $h = 0{,}26 + (0{,}27 - 0{,}26)\ (\frac{1590706}{2} - 673167)\ /$

$/\ 194397 = 0{,}27$ м.

Для расчета начальной высоты наката волны $H'_в$ и $H'_с$ при углах наклона наката $\alpha \leqslant 34^0$ рекомендуется использование следующих формул:

$$H'_в = 5{,}4 K_ш h_в \operatorname{tg}\alpha; \quad (126)$$

$$H'_с = 5{,}4 K_ш h_с \operatorname{tg}\alpha, \quad (127)$$

где $K_ш$ – коэффициент шероховатости отмели, принимаемой по Н.Н.Джунковскому, для песков с диаметром частиц 1,5–2,0 мм равным 0,775, а для крупного рваного камня равным 0,77; α – угол наклона фактической прибрежной отмели или угол наклона существующего берега в интервале от высоты, равной 2,8 h, над расчетным средним из редких высоких или средним из частых уровнем воды до расчетной глубины, равной 1,8 h.

Затем, после предварительных расчетов высоты наката, верхняя точка зоны наката уточняется и в случае значительных расхождений с принятой первоначально производится повторный расчет высоты наката.

При $\alpha > 34^0$ начальную высоту наката волны можно вовсе не учитывать, так как она практически не влияет на размеры первоначальной ширины отмели.

Имея величины $H_в$ и H_c, $H'_в$ и H'_c и профиль берегового склона на начало прогнозного срока, нетрудно путем построений определить $l_{в_0}$ и l_{c_0} (рис. 36).

4. Завершающий этап прогноза заключается в определении времени T по формуле (111) для нескольких значений Q, соответствующих заданным прогнозным профилям абразионного берега, с последующим построением зависимости $Q=f(T)$. Имея такую зависимость, легко определить Q за прогнозный срок T.

Значения l_c и $l_в$, необходимые при расчетах по формуле (111), определяются из выражений:

$$l_c = 1/2\,(l_{c_0} + l_{c_п}); \quad (128)$$

$$l_в = 1/2\,(l_{в_0} + l_{в_п}), \quad (129)$$

где $l_{c_п}$ и $l_{в_п}$ — ширина отмели по горизонтали соответственно при среднем из частых и при среднем из редких высоких уровнях воды, снятая с заданного прогнозного профиля абразионного берега.

Для построения такого профиля и определения с его учетом значений $l_в$ и l_c должны быть получены некоторые исходные параметры.

Глубины на внешнем краю отмели при среднем из редких высоких и среднем из частых уровнях воды принимаются одинаковыми с первоначальными $H_в$ и H_c.

Высоты наката волн ($H'_в$ и H'_c) на конец прогнозного срока рассчитываются так же, как и первоначальные, причем высотой H'_c во многих случаях из-за ее небольшой величины при построении прогнозного профиля можно принебречь.

Основание берегового обрыва при построении профиля берега должно соответствовать верхней точке наката волны при среднем из частых уровней воды (рис. 36). Исключение составляют построения прогнозного профиля берега при долгосрочном прогнозе для водохранилищ недельного или сезонного регулирования. Для них отметка основания берегового обрыва должна рассчитываться при максимальном из частых уровне воды.

Углы наклона свала отмели и надводного берегового откоса принимаются равными углам естественного откоса $\gamma_в$ и γ_c соответственно под и над водой (см. рис. 36) для твердого материала или снимаются с существующего профиля берегового склона.

Расчеты коэффициентов аккумуляции наносов $K_а$ на внешнем краю отмели производятся по одной из следующих формул:

а) при коротком вдольбереговом потоке наносов

$$K_а = (1 - M_к - M_т)\,N_н/N, \quad (130)$$

где $M_к$ и $M_т$ — доля частиц диаметром более 0,5 мм и менее 0,05 мм в составе размытых пород;

б) при сравнительно длинном вдольбереговом потоке наносов в зоне их дефицита

$$K_а = (1 - M_к - M_т)\,2N_н/(N + N_н + N_п); \quad (131)$$

в) при сравнительно длинном вдольбереговом потоке наносов в зоне их транзита

$$K_а = (1 - M_к - M_т)\,N_н/(N_н + N_п). \quad (132)$$

При наличии данных наблюдений за предшествующий период расчетная величина $K_а$ уточняется по фактической.

Объем аккумуляции материала размытой породы на внешнем краю отмели вычисляется по формуле

$$Q_а = QK_а. \quad (133)$$

На основании изложенных выше рекомендаций и расчетных формул (130)–(133) нетрудно вычертить любой заданный прогнозный профиль берега. С этого профиля снимаются значения $l_{в_п}$ и $l_{с_п}$ (см. рис. 36) и по формулам (128), (129) вычисляются $l_в$ и $l_с$.

Для получения зависимости $Q = f(T)$, позволяющей выполнить прогноз, обычно достаточно двух-трех расчетов T для заданных прогнозных профилей берега.

Снимаемая с графика $Q = f(T)$ прогнозная величина размыва берега Q для заданного срока T близка к средней, поскольку для вычисления суммарных волноэнергетичесих характеристик используются средние многолетние сведения о повторяемости в безледное время ветра и уровня воды в водоеме. По полученному значению Q и с учетом рекомендаций в п. 4 можно построить прогнозный профиль берега.

5. При долгосрочном прогнозе (более 10 лет) особенно при существенном изменении геолого-геоморфологических условий вдоль побережья рекомендуется выполнение расчетов по нескольким поперечным профилям в пределах участка протяженностью не менее 1 км. Это необходимо делать даже в том случае, если в конечном счете требуются прогнозные данные о размыве берега лишь на очень коротком отрезке. Время прогноза при этом разбивается на интервалы через 10–20 лет в зависимости от предполагаемой изменчивости береговой линии и роста прибрежной отмели, и прогноз производится последовательно для каждого промежуточного срока с учетом положения береговой черты и прибрежной отмели на начало этого срока.

6. Изложенный метод прогноза ВВАБ рассчитан на применение при формировании абразионного берега. Для того чтобы выяснить, не пойдет ли развитие берега по аккумулятивному пути, следует провести обследование участка и проанализировать гидрологические и геоморфологические материалы. Кроме того, рекомендуется сделать расчеты $N_п$ не только для створа, по которому дается прогноз ВВАБ, но и для соседних точек побережья с целью определения направления и интенсивности вдольберегового потока наносов. На мысах и в вогнутостях береговой линии в случае схождения потоков наносов, их высокой энергетической интенсивности и наличия в составе пород, слагающих побережье, частиц крупнее 0,05 мм есть основание предполагать, что здесь будет происходить не размыв берега, а рост аккумулятивных форм. На повороте берега в залив образование аккумулятивных форм возможно даже и тогда, когда поток наносов направлен от залива, что объясняется наличием вдольбереговой миграции наносов.

7. Прогнозные расчеты ветроволновой абразии берегов при значительных колебаниях уровня воды в безледное время, когда все уровни могут быть отнесены к частым и редким низким или только к частым, производятся по формуле

$$Q = T l K N_c / \rho K_A l_c^2. \qquad (134)$$

Выполнение прогноза в этом случае значительно упрощается.

8. Формула (134) может быть использована при необходимости для отдельного прогноза ВВАБ при низких уровнях воды, если последние имеют значительную повторяемость. В данном случае, принимая во внимание повторяемость низких уровней по интервалам и среднее их значение, производится определение нормальной составляющей энергии волн $N_н$ и средней высоты волны $h_н$ аналогично тому, как это рекомендуется делать при других уровнях. Все остальные операции прогноза ВВАБ ничем не отличаются от изложенных выше. Полученный в результате прогнозный профиль берега используется как начальный для проведения прогноза ВВАБ при других более высоких уровнях воды. Наличие прогноза уровенного режима позволяет выбрать более правильный порядок промежуточных операций прогноза ВВАБ при различных уровнях воды.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . 3
1. **Метеорологические наблюдения** . . . 7
2. **Изучение режима уровня воды** . . . 12
Общие положения . . . 12
Оборудование и методика наблюдений . . . 13
Статистическая обработка результатов наблюдений . . . 15
3. **Исследование волнения** . . . 20
Особенности ветрового волнения на водохранилищах . . . 20
Задачи учета волнения при проектировании гидротехнических сооружений и пути их решения . . . 21
Организация волномерных наблюдений . . . 23
Обработка материалов наблюдений . . . 25
Расчетные характеристики волнового режима . . . 27
Методы расчета элементов волн . . . 27
Режимно-климатические характеристики волнения . . . 29
4. **Изучение течений** . . . 39
5. **Изучение ледового режима** . . . 42
6. **Изучение температурного режима водохранилищ** . . . 47
7. **Изучение химического состава, электропроводности и плотности воды** . . . 51
Основные понятия . . . 51
Задачи изучения . . . 53
Приборы и оборудование . . . 55
Методика наблюдений . . . 58
Обработка материалов наблюдений . . . 59
Анализ результатов наблюдений . . . 63
8. **Изучение перемещения прибрежных наносов** . . . 64
9. **Изучение рельефа дна водохранилищ** . . . 71
Производство промерных работ . . . 71
Обработка и интерпретация результатов промерных работ . . . 75
10. **Изыскания для оценки и прогноза динамики берегов** . . . 77
Общие задачи и пути их решения . . . 77
Методы оценки и прогноза динамики берегов . . . 78
Рекомендации по изысканиям для оценки и прогноза динамики берегов . . . 80
11. **Применение геодезических методов** . . . 83
Назначение и виды геодезических работ . . . 83
Геодезические инструменты и приборы . . . 83
Плановое и высотное обоснование гидрологических работ . . . 83
Проложение промерных галсов . . . 84
Координирование точек гидрологических измерений . . . 84
12. **Применение аэрофотосъемки** . . . 86
Краткие сведения об аэрофотоснимках и их свойствах . . . 86
Общие сведения по дешифрированию аэрофотоснимков . . . 88
Дешифрирование основных элементов ландшафта побережий . . . 90
Дешифрирование берегоформирующих процессов и явлений . . . 93
Применение аэрофотосъемки для изучения гидрологических процессов в водохранилищах . . . 97
Съемка течений . . . 97
Изучение волнения . . . 103
Приложение 1. Номограмма для расчета длины маршрута, интервала времени между двумя последовательными аэрофотосъемками и ошибки определения скорости течения . . . 108
Приложение 2. Учет рефракции в геодезическом нивелировании . . . 111
Приложение 3. Метод прогноза ветроволновой абразии берегов . . . 120

ПНИИИС Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ИЗЫСКАНИЯМ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией Л.Г. Бальян
Редактор И.А. Баринова
Мл. редактор М.В. Милейко
Технический редактор И.В.Берина
Корректор Е.Р.Герасимюк
Н/К

Подписано в печать 24.12.85 г. Т-06792 Формат 84x108 1/32
Набор машинописный Печать офсетная Бумага офсетная № 2
Усл. печ. л. 6,93 Уч.изд.л. 10,59 Усл.кр.-отт. 7,24 Тираж 5000 экз.
Изд. № XII-501 Зак. № 42 Цена 55 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г.Тула, пр.Ленина, 109

gost.e-ecolog.ru