АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД

Н. В. БУТОРИН
Н. А. ЗИМИНОВА
В. П. КУРДИН

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

810773

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАД · 1975

Введение

На современном этапе развития общества область вмешательства человека в естественный ход природных процессов непрерывно расширяется. Одна из форм такого воздействия на природные процессы — гидротехническое строительство. В ходе его создаются искусственные водоемы-водохранилища. Некоторые из них по своим размерам соизмеримы с крупнейшими озерами мира.

Водохранилища становятся неотъемлемой чертой ландшафта. Каждое из них представляет собой сложный географический объект. Наиболее важной особенностью водохранилищ по сравнению с естественными водоемами является большая изменчивость их морфометрических, гидрологических, гидрохимических характеристик во времени. Достаточно отметить, что площадь акватории такого крупного водохранилища, как Рыбинское, в отдельные годы при зимней сработке уменьшается почти наполовину. Естественно, что при этом меняются и все другие морфометрические характеристики водоема. Это связано с искусственным регулированием объема вод, наполняющих водохранилища. Последнее обстоятельство обусловливает особый, присущий только водохранилищам, гидрологический и гидрохимический режим, который формируется при аккумуляции речных вод и их использовании.

Гидрологическому и гидрохимическому изучению отдельных водохранилищ, каскада их на ряде рек посвящены исследования многих авторов, причем некоторые из них носят характер монографических обобщений (Зенин, 1965; Авакян, Шарапов, 1968; Буторин, 1969). В результате этих и многих других исследований выявлены особенности тех или иных элементов режима, установлено, что решающая роль в изменении их принадлежит динамике водных масс, получены комплексные характеристики отдельных водохранилищ и каскадов. Наряду с этим до самого последнего времени слабо изучены донные отложения водохранилищ.

Исследования донных отложений в водохранилищах имеют большое общелимнологическое значение. В относительно молодых, искусственно созданных водоемах, находящихся на ранних стадиях развития, накопление донных отложений — основной, типический вид накопления вещества (Россолимо, 1964). Характер накопления и распределения, механический и химический состав их отражают весь комплекс процессов, протекающих в водоеме. Всестороннее изучение донных отложений водохранилищ представляет значительный интерес прежде всего при выяснении их роли в круговороте органического вещества в этих водоемах, для суждения об условиях жизни донной фауны водохранилищ, особенностях ее распределения и продуктивности. Количественная оценка источников грунтообразующего материала и интенсивности заполнения чаши водохранилищ отложениями совершенно необходима для правильной оценки сроков заиления водоемов и их эффективной эксплуатации.

Возросший интерес прежде всего к заилению водохранилищ обогатил научную литературу рядом интересных работ, в которых приводятся данные о характере и интенсивности заиления водохранилищ, и предпринята попытка его расчета. Одну из наиболее полных сводок по вопросам заиления водохранилищ представляет работа Г. И. Шамова (1939).

Несмотря на известный интерес к заилению водохранилищ, вопросы формирования, распределения донных отложений в этих водоемах, их физические и химические свойства остаются слабо изученными. Это относится и к старейшим водохранилищам волжского каскада — Иваньковскому, Угличскому и Рыбинскому.

Первые сведения о донных отложениях Иваньковского водохранилища приведены Л. Л. Россолимо (1950), А. В. Гаверманом (1955) и А. А. Потаповым (1954). Л. Л. Россолимо высказывает некоторые соображения о ходе седиментации в Иваньковском водохранилище, рассматривает механический и химический состав отложений. Эти исследования представляют несомненный интерес, хотя и базируются на весьма ограниченном материале. А. В. Гаверман рассматривает в самых общих чертах распределение грунтов по всему Иваньковскому водохранилищу, а А. А. Потапов — преимущественно в заливах, в которых развивается прибрежно-водная растительность.

Подобных работ по Угличскому водохранилищу нет. Рыбинское водохранилище в этом отношении оказалось в более благоприятном положении: наблюдения над формированием грунтового комплекса были начаты вскоре после создания этого водоема (Овчинников, 1950). Д. Д. Кудрявцевым (1950) дана характеристика основных физико-химических свойств илов Волжского плёса Рыбинского водохранилища. Некоторые сведения о роли переработки берегов в формировании донных отложений водохранилища приведены А. В. Живаго (1951, 1954). Самая общая характеристика основных типов грунтов и предварительная схема

их распределения в 1952—1953 гг. даны Ф. Д. Мордухай-Болтовским (1955). Кроме перечисленных работ, встречаются описания грунтов на отдельных участках водохранилищ (преимущественно в прибрежных районах), основанные на визуальной оценке.

Отсутствие более полных сведений о донных отложениях водохранилищ — существенный пробел в комплексных лимнологических исследованиях этих водоемов. Для ликвидации его необходимо накопление фактических материалов наблюдений, теоретические и методические разработки проблемы формирования грунтового комплекса водохранилищ.

Изучение донных отложений верхневолжских водохранилищ было включено в программу работ лаборатории гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР и с 1955 г. приняло характер детального исследования. Помимо непосредственного изучения грунтового комплекса, с 1959 г. ведутся исследования водных взвесей в водохранилищах. Это позволяет дать характеристику и количественную оценку одного из важнейших факторов формирования донных отложений водохранилищ и выразить осадконакопление в них как функцию соотношения прихода и расхода взвешенного вещества. Материалы работ лаборатории за 1955—1970 гг. и послужили основой настоящей работы.

ГЛАВА I

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Особенности гидрологического режима водохранилищ оказывают существенное влияние на формирование грунтового комплекса. Они наряду с режимом эксплуатации водохранилища определяются физико-географическими условиями и морфометрией водоема. Основные сведения о гидрологическом режиме рассматриваемых водохранилищ приведены в работах Н. А. Зиминовой (1959), Т. Н. Курдиной (1959), Н. В. Буторина (1969) и ряда других авторов. Здесь мы отметим лишь те особенности водного режима, которые имеют наиболее важное значение при формировании и распределении грунтов.

Географическое положение, морфологические и морфометрические особенности

Иваньковское, Угличское и Рыбинское водохранилища располагаются в одной природной зоне и в близких климатических условиях. Иваньковское водохранилище (рис. 1) находится в юж-

ной части Верхневолжской низины. Оно имеет довольно сложную конфигурацию и подразделяется на Иваньковский, Волжский и Шошинский плёсы (Гавеман, 1955). Угличское водохранилище (рис. 2) образовано подпором Волги плотиной у г. Углича.

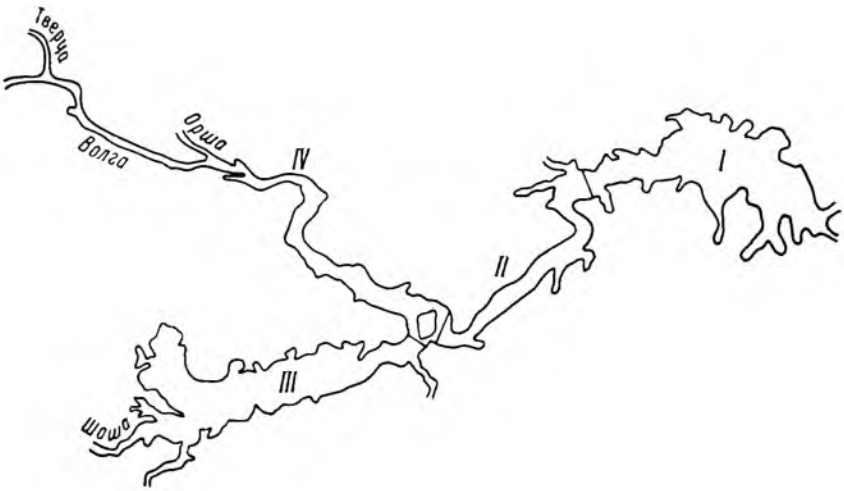


Рис. 1. Схема Иваньковского водохранилища.
Римские цифры — участки, на которых определялась величина осадконакопления.

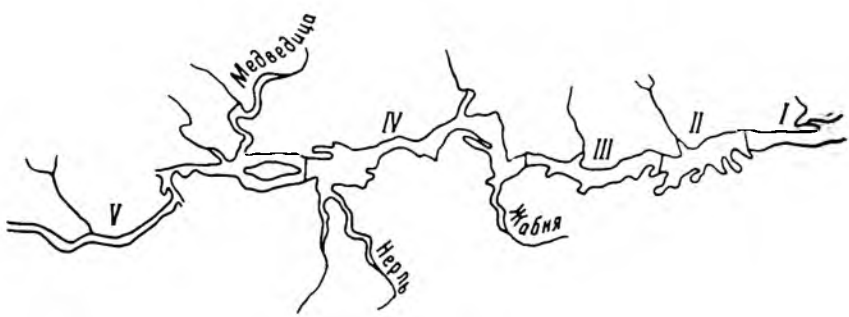


Рис. 2. Схема Угличского водохранилища.
Обозначения те же, что на рис. 1.

Длина его по руслу 150 км, ширина в приплотинном участке 2—3 км. По очертаниям и ширине зеркала, близкой к ширине русла Волги, это водохранилище относится к русловому типу (Шамов, 1959), и лишь приплотинный участок напоминает водоем долинного типа. По морфометрическим особенностям и различиям водного режима в нем выделяются 3 участка — верхний, средний и нижний (Курдина, 1959). Верхний участок (от Иваньковского гидроузла до устья р. Медведицы) — наиболее узкий

речной участок водоема. Средний участок, ширина которого за счет затопленной поймы несколько больше по сравнению с верхним участком, охватывает район от устья Медведицы до с. Прилуки. Нижний приплотинный участок (от с. Прилуки до Угличского гидроузла) наиболее широкий и глубоководный. Из-за небольшого объема (табл. 1) Угличское водохранилище

Таблица 1

Основные характеристики водохранилищ

Характеристики	Иваньковское	Угличское	Рыбинское
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м	124.0	113.0	102.0
Уровень зимней сработки, м	118.0	107.5	97.0
Пределы колебания уровня наполнения, м	124.3—124.5	113.0—113.4	100.0—102.4
Площадь зеркала, км^2	327	249	4550
Объем:			
при НПУ, км^3	1.12	1.24	25.5
полезный, км^3	0.96	0.80	17.0
Средняя глубина, м	3.4	5.0	5.6
Средний приток:			
годовой, км^3	11.0	13.5	33.3
весенний, км^3	5.1	6.3	15.0
Средний годовой коэффициент водообмена	13.6	12.4	1.7

осуществляет лишь неполное сезонное регулирование стока. По характеру водообмена оно сходно с Иваньковским — объем водной массы сменяется в среднем один раз в месяц.

Рыбинское водохранилище (рис. 3) по своей конфигурации существенно отличается от Угличского и Иваньковского. Конфигурация его определяется основными формами рельефа Молого-Шекснинской низины. Водохранилище вытянуто с северо-запада на юго-восток. Его северо-восточный и юго-западный берега почти параллельны и несколько сближаются в южной части водоема. Изрезанность берегов незначительна. Между этими берегами в водохранилище врезается Молого-Шекснинский полуостров длиной 55 км и шириной около 35 км. Береговая линия полуострова сильно изрезана, ее протяженность 526 км. Общая протяженность береговой линии водоема 2150 км.

Рыбинское водохранилище — мелководный водоем, средняя глубина его 5.6 м. Глубины от 0 до 2 м занимают около 21% площади водохранилища и распространены в основном вокруг Молого-Шекснинского полуострова и в юго-западной части Главного плёса. У северо-восточного побережья мелководная зона наиболее развита вокруг острова, расположенного к юго-западу от устья

р. Конгоры. Свыше половины площади водоема занимают глубины до 6 м, соответствующие приблизительно средней глубине водохранилища, и лишь 27.1% занято глубинами свыше 8 м. Распределение больших глубин в водохранилище связано с расположением русел рек (рис. 4). По руслу Волги глубины колеблются от 11 до 23 м, а по руслам Мологи и Шексны — от 11 до 30 м.

Рис. 3. Схема Рыбинского водохранилища.

Плёсы: *I* — Волжский, *II* — Моложский, *III* — Шекснинский, *IV* — Главный. *Арабские цифры* — участки, на которых определялась величина осадконакопления.

Рис. 4. Расположение русел рек, затопленных водохранилищем.

По расположению глубин и морфологическим особенностям ложа водохранилище подразделяется на 4 основных плёса — Волжский, Моложский, Шекснинский и Главный (Фортунатов, 1959). По рельефу дна они существенно различаются. Волжский плёс в нижнем бьефе Угличской ГЭС представляет собой русло Волги хорошо выраженной корытообразной формы с крутыми ровными склонами и небольшими поднятиями дна (рис. 5, *а*). Русло постепенно расширяется вниз по течению, сохраняя прежнюю форму, имеет более пологие склоны и относительно ровное дно. С приближением к открытой части водохранилища и залитием пойменных участков рельеф дна значительно усложняется. В районе с. Коприна рельеф дна имеет резкие изломы, особенно в местах бывших речек и ручьев (рис. 5, *б*). Значительно слож-

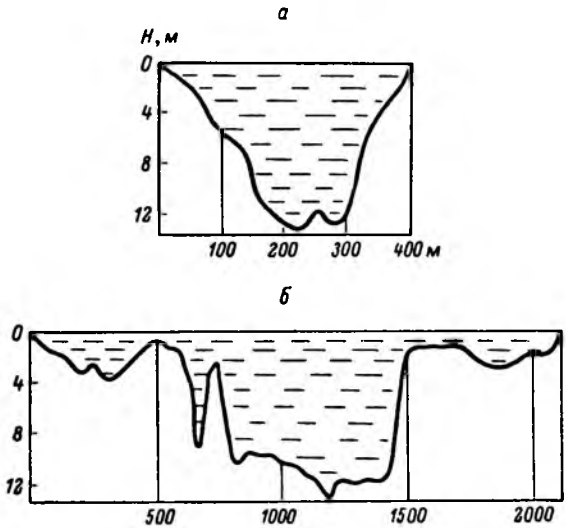


Рис. 5. Поперечные профили дна Волжского плёса Рыбинского водохранилища.

а — пос. Мышкино, *б* — с. Коприно.

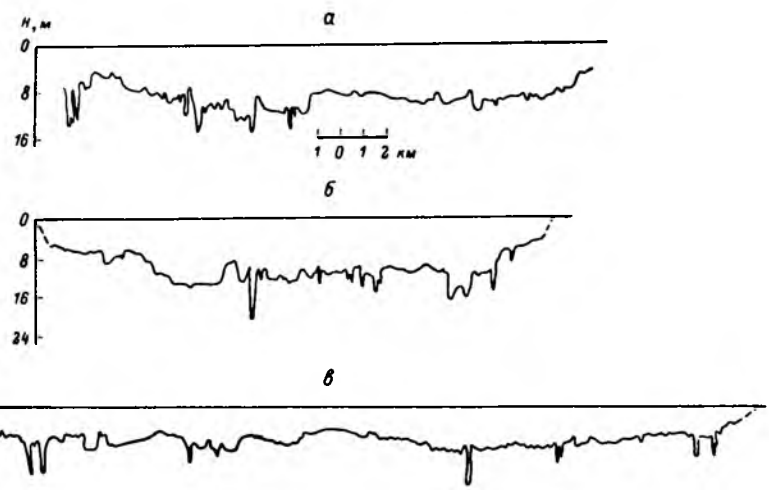


Рис. 6. Поперечные профили дна Рыбинского водохранилища по разрезам.

а — Первомайские острова — мыс Центральный, *б* — с. Копорье—с. Гаютино, *в* — с. Леонтьевское—с. Колобово.

нее рельеф дна Моложского плёса в районе Первомайских островов (рис. 6, *а*). Русло Мологи здесь с очень крутыми склонами и отдельными повышениями дна. От русла в сторону Главного плёса рельеф дна имеет неровный характер: встречаются резкие повышения и понижения дна, причем некоторые из них достигают 5—6 м. Не менее сложен рельеф дна и Шекснинского плёса. Русло Шексны в пределах водохранилища на отдельных участках имеет большую извилистость, и рельеф дна на них особенно сложен (рис. 6, *б*). По своим размерам и форме неровности рельефа дна на отдельных участках Главного плёса различны: иногда это резкое и небольшое поднятие или опускание дна, в отдельных случаях обширные понижения также с большими неровностями дна (рис. 6, *в*).

Берега Рыбинского водохранилища представляют собой склоны древних озерных и речных террас. Берега Главного плёса преимущественно пологие, низкие, на многих участках заболоченные. Разработка профиля таких берегов идет с усиленной аккумуляцией отложений в средней его части и с образованием подводного вала, который способствует созданию новой береговой линии, выдвинутой в сторону водохранилища (Живаго, 1954). Берега Волжского плёса на большом протяжении высокие, обрывистые, сложены суглинками, межморенными песками и отложениями юрской и меловой систем, изрезаны долинами мелких притоков и оврагами. Берега Шекснинского и Моложского плёсов имеют высоту 2—6 м. Общая длина абразионных берегов 152 км. Участки абразии расположены в основном в речных плёсах водохранилища.

Характеристика водного питания и водный баланс

Территория бассейна верхневолжских водохранилищ характеризуется избыточным увлажнением. Величина годового испарения с поверхности бассейна примерно в 1.5 раза меньше суммы годовых осадков. Сочетание избыточного увлажнения с характером четвертичных отложений, представленных главным образом суглинками и супесями, способствовало возникновению хорошо развитой речной сети. Общее количество рек длиной более 10 км, впадающих в Рыбинское водохранилище, — 64.

Основная роль в питании рек принадлежит снежному покрову. Величина среднего годового модуля стока колеблется в пределах 6—12 л/сек.·км^2. Наибольшие модули приходятся на северную и восточную части территории водосбора, наименьшие — на заболоченные пространства в бассейне Мологи. По характеру водного режима реки бассейна относятся к восточноевропейскому типу. Сток половодья в среднем, по многолетним данным, для района Рыбинского водохранилища составляет 54% годового, сток летне-осеннего периода — 30, зимнего — 16%. В Иваньковском водохранилище несколько больше, чем в Рыбинском, доля летне-осеннего

стока. Величина весеннего стока равна 45%, летне-осеннего — 39, зимнего — 16% годового (Зиминова, 1959).

Водный баланс — один из основных факторов, обусловливающих динамику водных масс и особенности гидрологических процессов в водохранилищах. Искусственное регулирование объема вод, наполняющих водохранилища, придает ему своеобразие по сравнению с естественными водоемами замедленного водообмена, а характер использования водных ресурсов отдельных водохранилищ накладывает отпечаток на составляющие баланса. Основная составляющая приходной части водного баланса рассматриваемых водохранилищ — речной сток. В наполнении и питании Иваньковского водохранилища решающую роль играет Волга. Она доставляет 56.6% общего притока воды в водохранилище, а вместе со стоком Тверцы, которая впадает в Волгу выше выклинивания подпора, до 82%.

В расходной части водного баланса Иваньковского водохранилища преобладает суммарный сброс воды через сооружения гидроузла. Он составляет 84.5% от суммы общего расхода и включает использование воды на работу агрегатов ГЭС, сбросы ее через водосливную плотину и донные отверстия, а также расходы воды на шлюзование. Второй по величине составляющей расходной части водного баланса является забор воды в канал им. Москвы.

Средний многолетний водный баланс Иваньковского водохранилища за 1951—1956 гг., по расчетам Н. А. Зиминовой (1959), выражается следующими величинами (км^3).

Приход		Расход	
Приток	11.08	Сброс через гидроузел	9.34
Возврат воды шлюзом № 2 и насосной станцией № 182	0.13	Забор в канал	1.02
Осадки	0.15	Испарение	0.14
Затопленный лед и снег	0.08	Обсохший лед	0.07
Изменение объема за год	0.02		
Ошибки	0.45	Ошибки	0.44
Всего	11.02	Всего	11.01

Иваньковское водохранилище характеризуется высоким водообменом: в среднем условный объем его обновляется за 26 дней. Наиболее интенсивный водообмен в водохранилище наблюдается весной. В период летне-осенней межени он резко уменьшается и вновь увеличивается во второй половине зимы. Различия в интенсивности водообмена по годам отмечаются лишь для весны. В остальные сезоны водообмен меняется из года в год незначительно.

Основной составляющей приходной части водного баланса Угличского водохранилища является сброс воды из Иваньковского водохранилища — 67.6% общего притока в водоем. Наиболее крупные притоки Угличского водохранилища — Медведица, Дубна и

Нерль — дают 26.7% притока. В расходной части водного баланса, как и в Иваньковском водохранилище, решающую роль играет сброс воды через сооружения гидроузла. Средние данные по многолетним составляющим водного баланса Угличского водохранилища (км³) за 1950—1956 гг. (по: Курдина, 1959) приведены ниже.

Приход		Расход	
Приток	13.89	Сброс	13.08
Осадки	0.14	Испарение	0.08
Затопленный лед	0.05	Фильтрация	0.10
Изменение объема за год	0.01	Обсохший лед	0.05
Ошибки	0.39	Ошибки	0.39
Всего	13.70	Всего	13.70

В расходной части водного баланса Угличского водохранилища некоторые особенности по сравнению с Иваньковским и Рыбинским водохранилищами имеет лишь испарение. В результате морфометрических особенностей Угличского водохранилища объем испаряющейся воды в нем составляет лишь 57% годового объема осадков. В Иваньковском и Рыбинском водохранилищах величины осадков и испарения практически равны между собой.

По характеру водообмена Угличское водохранилище сходно с Иваньковским. Расчетные данные показывают, что условный объем водной массы водохранилища обновляется в среднем один раз в месяц (Курдина, 1959). Как и в Иваньковском водохранилище, наибольшая интенсивность водообмена наблюдается в весенний и зимний периоды, а наименьшая — летом и осенью. Характер внутригодового водообмена относительно устойчив, и наиболее существенные различия в интенсивности водообмена из года в год отмечаются лишь для весны.

Основную роль в питании Рыбинского водохранилища играют воды 3 крупных рек — Волги, Мологи и Шексны. Они вносят в водоем около 2/3 общего притока. Соотношение отдельных составляющих приточности Рыбинского водохранилища (по: Рутковский, Курдина, 1959) приведено ниже.

Река	Створ	Приточность, %
Волга	Углич	36
Молога	Устюжна	13
Шексна	Черная Гряда	15
Остальные реки		36

Сезонное распределение его в результате сооружения Иваньковского и Угличского гидроузлов на Волге и Череповецкого на Шексне отличается от естественного. Частичная аккумуляция весеннего половодья и стока летне-осенних паводков выше расположенными водохранилищами заметно уменьшила весенний и летне-осенний сток Волги и Шексны, а попуски воды из Углич-

ского и Шекснинского водохранилищ значительно увеличили зимний сток. Так, например, для маловодного 1954 года весенний сток Волги оказался равным по объему зимнему. Для маловодных и средних по водности лет распределение стока по сезонам стало более равномерным.

Внутригодовое перераспределение стока не повлияло на основные составляющие водного баланса Рыбинского водохранилища. Основной составляющей приходной части его являются приток речных вод и поступление их из Угличского и Шекснинского водохранилищ, а в расходной — сброс воды через сооружения Рыбинского гидроузла (табл. 2). В отличие от Иваньковского

Таблица 2

Средний годовой водный баланс Рыбинского водохранилища и пределы колебаний его отдельных элементов с 1947—1948 по 1954—1955 гг.

Элемент водного баланса	Средний приход, км³	Пределы колебаний годовых величин, км³	Элемент водного баланса	Средний расход, км³	Пределы колебаний годовых величин, км³
Приток	33.30	27.8—46.4	Сброс	31.30	23.6—44.4
Осадки	2.08	1.7—2.9	Испарение . .	2.15	1.6—2.5
			Фильтрация . .	1.2	—
			Изменение объема водохранилища с апреля 1947 по апрель 1955 г. . . .	0.2	—
Ошибки	—0.26	0.75%	Ошибки	0.27	0.75%
Всего . .	35.12		Всего	35.12	—

Примечание. Данные приведены по работе В. И. Рутковского и Т. Н. Курдиной (1959).

и Угличского водохранилищ, в которых большая часть вод весеннего половодья проходит транзитом, в Рыбинском водохранилище весной поступление воды превышает расход в среднем на 12.7 км³ (Рутковский, Курдина, 1959).

По характеру водообмена Рыбинское водохранилище сильно отличается от Иваньковского и Угличского. Условный объем его водной массы сменяется в среднем один раз за 7 месяцев, т. е. интенсивность водообмена в нем примерно в 7 раз меньше, чем в этих водоемах.

Таким образом, водный баланс каждого из рассматриваемых водохранилищ существенно отличается не только от баланса естественных водоемов замедленного водообмена, но и имеет некоторые особенности. Специфичность его особенно ярко проявляется в изменениях уровня водохранилищ.

Уровенный режим

Колебания уровня в водохранилищах происходят под влиянием целого ряда факторов, но основными из них являются приток и сток воды из водоема. Различие в соотношении этих величин вместе с особенностями морфометрии и хозяйственного использования водных ресурсов приводят к некоторым различиям в характере колебаний уровня в отдельных водохранилищах. Даже в различных частях одного и того же водоема колебания уровня имеют свою специфику.

Наполнение верхневолжских водохранилищ до НПУ обычно происходит в апреле, а Рыбинского продолжается и в мае. В Иваньковском водохранилище продолжительность наполнения в среднем 15 дней. В летне-осенний период уровень в этом водоеме колеблется незначительно, но в отдельные годы амплитуда колебания его может достигать 1.5 м (Курдин, 1961а). Понижение уровня за счет зимней сработки начинается с установления ледостава и продолжается до конца марта—начала апреля. Общая предполоводная сработка водохранилища составляет 6 м, а максимальная может достигать 7 м. Характер изменения уровня водохранилища в годовом цикле и его особенности на отдельных участках видны на кривых рис. 7.

Аналогичный характер изменений уровня в течение года наблюдается и в Угличском водохранилище. При небольшом объеме этого водохранилища в нем, как правило, в летне-осенний период поддерживается уровень, близкий к НПУ. По данным В. П. Курдина (1963), амплитуда колебания уровня в период, свободный ото льда, за 1948—1957 гг. изменялась от 0.8 до 1.4 м и только в 1955 г. достигала 2.1 м. При этом отклонения уровня от НПУ не превышали +0.8 и —0.9 м. Исключение составлял лишь 1955 г., когда зарегистрирован уровень ниже НПУ на 1.6 м. Относительная стабильность уровня воды в летне-осенний период в Угличском, как и в Иваньковском водохранилище, определяет незначительную переработку грунтов ранее сформировавшейся отмели и мелководий этих водохранилищ.

В отличие от Иваньковского водохранилища в Угличском уровень воды близок к отметке НПУ и в зимний период. Резкое понижение его происходит лишь в марте и апреле.

Режим уровня в Рыбинском водохранилище коренным образом отличается от такового в Иваньковском и Угличском водохранилищах. Несмотря на то что в нем, как и в двух верхних водохранилищах каскада, в годовом цикле уровня наблюдаются 3 характерных периода (весеннего наполнения, летне-осенней и зимней сработки), характер колебаний уровня в одни и те же периоды из года в год сильно меняется (Буторин, 1963б).

В сезонном ходе уровня Рыбинского водохранилища из года в год происходят значительные изменения, причем не только в величине амплитуды, но и в характере самих колебаний. Амплитуды

сезонных колебаний уровня в отдельные годы достигают 5—8 м. Наибольшие значения их наблюдаются в нижнем бьефе Угличской ГЭС, участок которого иногда выходит из зоны подпора Рыбинского водохранилища, и колебания уровня здесь определяются режимом работы Угличской ГЭС. Даже полученная путем осредне-

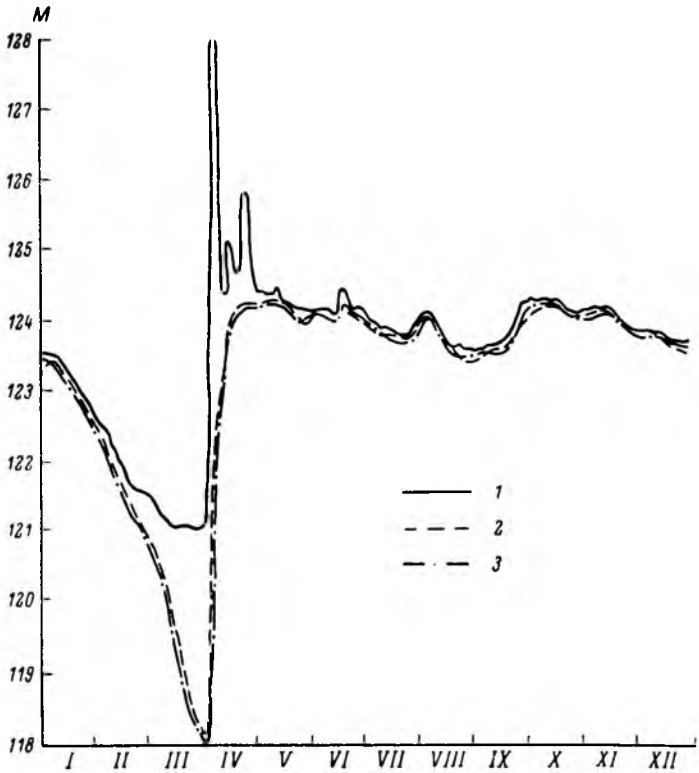


Рис. 7. Годовой ход уровня в Иваньковском водохранилище в 1957 г.
1 — у г. Калинина, *2* — у с. Конакова, *3* — Большая Волга (по: Зиминова, 1959).

ния средних месячных уровней годовая амплитуда колеблется от 2.85 до 3.37 м.

В широких пределах изменяются в Рыбинском водохранилище и среднегодовые значения уровня. В отдельных случаях величина колебаний их превышает 2 м.

Общий характер изменения уровня в Рыбинском водохранилище представлен рядом кривых (рис. 8), которые показывают, что в этом водоеме иногда наблюдаются значительные колебания уровня и в летне-осенний период, чего не происходит в Иваньковском и Угличском водохранилищах.

Кроме колебаний уровня, связанных с изменением запасов воды в Рыбинском водохранилище, наблюдаются также изменения его, возникающие в результате различного рода денивеляций. Основной из них является сгонно-нагонная, или ветровая, денивеляция. По данным Ф. И. Белых (1959), в зависимости от направления и скорости ветра повышение уровня у наветренного берега

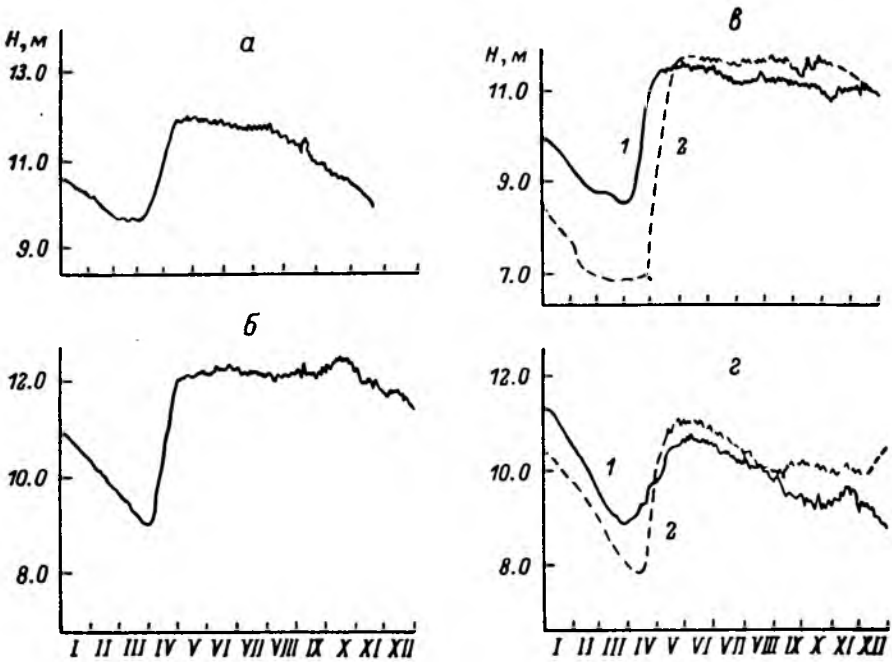


Рис. 8. Изменение уровня воды в Рыбинском водохранилище.

а — первый тип (1949 г.), *б* — второй тип (1953 г.), *в* — третий тип (*1* — 1950 г., *2* — 1956 г.), *г* — четвертый тип (*1* — 1954 г., *2* — 1960 г.).

водохранилища достигает 10—30 см, а при штормах — 50—70 см. Поскольку район Рыбинского водохранилища отличается большим числом дней со значительной скоростью ветра, а морфометрические особенности благоприятствуют его разгону, повторяемость сгонно-нагонных колебаний уровня в этом водохранилище достаточно велика.

Таким образом, режим уровня верхневолжских водохранилищ характеризуется следующими общими чертами: 1) сравнительно быстрым подъемом в начале половодья; 2) наиболее высоким положением в конце половодья и в течение последующего летне-осеннего периода; 3) неодинаковой по продолжительности и срокам сработкой, осуществляемой преимущественно зимой, а в Рыбинском водохранилище иногда со второй половины лета;

4) минимальными отметками в предполоводный период. Наряду с общими чертами в изменениях уровня рассматриваемых водохранилищ наблюдаются и существенные различия, которые относятся прежде всего к летне-осеннему периоду. Если положение уровня в Иваньковском и Угличском водохранилищах в этот период характеризуется относительной стабильностью, то в Рыбинском водохранилище таковой не наблюдается. Навигационные попуски и ветровая деятельность приводят к значительным изменениям уровня этого водоема в указанное время. Стабильность положения уровня для рассматриваемого периода в Иваньковском и Угличском водохранилищах сохраняется не только в течение года, но и из года в год. Уровень Рыбинского водохранилища как по высоте отметки наполнения, так и по продолжительности стояния около этой отметки в отдельные годы сильно меняется.

Отмеченные особенности в уровенном режиме водохранилищ оказывают влияние на формирование их грунтов, так как от высоты и режима уровня зависит воздействие волнения на дно водоема, а также на интенсивность переформирования берегов.

При одинаковых отметках уровня в летне-осенний период постоянство глубин ограничивает зону воздействия волн, в которой сравнительно быстро достигается динамическое равновесие. Это приводит к относительной стабилизации рельефа дна и берегов. При различной продолжительности и высоте стояния уровня происходит переработка ранее образовавшихся форм берегового и донного рельефа, и процессы их формирования растягиваются во времени.

Волнение

Наиболее существенное развитие имеют в водохранилищах 2 вида волнения — ветровое и судовые волны. Ветровое волнение наибольшее влияние оказывает на процессы грунтообразования в открытых участках водохранилищ, а судовые волны — на суженных участках и при прохождении судового хода вблизи берегов. Под воздействием волнения происходит размыв берегов и участков дна, расположенных в пределах зоны его размывающего действия.

В каждом водохранилище в зависимости от его конфигурации, площади и глубины существуют свои пределы усиления волнения, определяющие параметры волн. Так, для Иваньковского водохранилища расчеты показали, что при нормальном подпорном уровне ветер со скоростью 10 м/сек. в Шошинском плёсе может вызывать волну высотой 0.50 м, а в Иваньковском — 0.65 м. При возрастании скорости ветра до 20 м/сек. высота волны в этих плёсах увеличивается до 1.0 и 1.4 м соответственно.

Действие волн указанной высоты на дно ограничивается глубинами 1.7 м в Шошинском и 3 м — в Иваньковском плёсе. Расчеты, произведенные с введением поправки на сработку уровня

в навигационный период, показали, что действие волнения на дно распространяется до глубин 2.7 и 4 м от НПУ соответственно в Шошинском и Иваньковском плёсах (Курдин, 1961а). Поскольку ветры со скоростью 10 м/сек. по повторяемости в районе водохранилища значительно преобладают над ветрами в 20 м/сек., глубины размывающего действия волнения несколько меньше указанных величин.

Глубины размывающего действия волнения играют важную роль в процессе формирования донных отложений, так как между их отметками для часто повторяющихся и максимальных волн

Таблица 3

Высота волн (h) и глубина (H) размывающего их действия для условий Угличского водохранилища (участок р. Пикша-Углич), м

Разгон волны	Скорость ветра, м/сек.					
	5		10		20	
	h	H	h	H	h	H
2.0	0.2	0.2	0.4	0.4	0.8	1.0
10.0	0.3	0.3	0.6	0.7	1.3	2.0

Примечание. Данные приведены по работе В. П. Курдина (1963).

концентрируется наиболее подвижная часть отложений водоема, которая, с одной стороны, предохраняет первичные грунты от размыва, а с другой — подвергается трансседиментации.

Наиболее сильное волнение в Угличском водохранилище может развиваться лишь в приплотинном участке, между рекой Пикшей и плотиной ГЭС. При северных и южных ветрах разгон волны в этом районе водохранилища может достигать 10 км, а при восточных и западных — около 2 км (табл. 3). Для приведенных разгонов волн даны высота волн 15%-й обеспеченности и глубина их размывающего действия. Высоты волн найдены по номограммам А. П. Браславского с введением коэффициента для перехода к указанной обеспеченности, поскольку она принимается при расчете береговых переформирований (Кондратьев, 1960).

По расчетам В. П. Курдина (1963), для условий наиболее часто повторяющихся ветров со скоростью 10—15 м/сек. и наибольшего разгона глубина размывающего действия волны на рассматриваемом участке водохранилища около 1 м. Следовательно, при ежегодной средней навигационной сработке водохранилища порядка 0.7 м отметка края береговой отмели должна находиться на 1.7 м ниже НПУ. Площадь дна Угличского водохранилища

с глубинами до 1.7 м составляет 31%, из них 20% приходится на глубины до 1 м. Поскольку бо́льшая часть мелководий расположена на участках, недоступных значительному ветровому волнению (заостровные пространства на участке г. Белый Городок—г. Калязин, заливы), можно предполагать, что площадь дна, подверженная переформированию за счет ветрового волнения, значительно меньше указанной. Кроме того, на береговых отмелях, сформированных из продуктов абразии надводного склона, грунт аккумулятивной части отмели уже отсортирован и беден частицами, способными переотлагаться. Следовательно, площади, продуцирующие грунтообразующий материал при волновой абразии, в Угличском водохранилище незначительны.

При большой площади зеркала Рыбинского водохранилища ветровое волнение в нем имеет бо́льшие размеры, чем в Иваньковском и Угличском водохранилищах. Наглядное представление о пространственном распределении волнения на этом водоеме при северном направлении ветра и скорости его 18 м/сек. дает картограмма изолиний высот волн (рис. 9). Наибольшие высоты волн отмечаются в районе затопленных долин Шексны и Мологи. На отдельных участках их высота волны достигает 2 м и более. С приближением к району междуречья и берегам высоты волн заметно уменьшаются.

Как указывает Е. М. Селюк (1959), подобное пространственное распределение волнения на водохранилище сохраняется при ветрах северо-западного и юго-восточного направлений. При ветрах этих направлений районами наиболее интенсивного волнения оказываются также затопленные долины Шексны и Мологи. В зависимости от скорости ветра может заметно изменяться лишь высота волн. Так, при ветре указанных направлений и скорости его 18 м/сек. высота волн в этих районах достигает 1.70—1.75 м, а при скорости 9 м/сек. она уменьшается до 0.9 м. С изменением направления ветра пространственное распределение волнения может отличаться от распределения, приведенного на картограмме (рис. 9). При ветрах северо-восточного и юго-восточного направлений район повышенного волнения охватывает не только затопленные долины Шексны и Мологи, но частично распространяется на междуречье. При данных направлениях ветра два очага повышенной волновой активности, расположенные по Шексне и Мологе, объединяются в один, захватывая при этом и междуречье. Максимальные высоты волн при тех же скоростях ветра сохраняются такими же, как и при ветрах северо-западного и юго-восточного направлений.

Высоты волн в центральной части Рыбинского водохранилища довольно устойчивы. Максимальная высота, наблюдавшаяся при сильных штормовых ветрах, превышала 2.5 м. На открытых глубоководных акваториях затопленных долин Шексны и Мологи значительное волнение с максимальной высотой волн 0.5—0.6 м развивается обычно уже при ветре 6—7 м/сек., а при увеличении

скорости ветра до 16—18 м/сек. высота волны достигает своего максимального значения — 2 м.

Характерной особенностью ветрового волнения на водохранилищах является относительно большая по сравнению с морскими

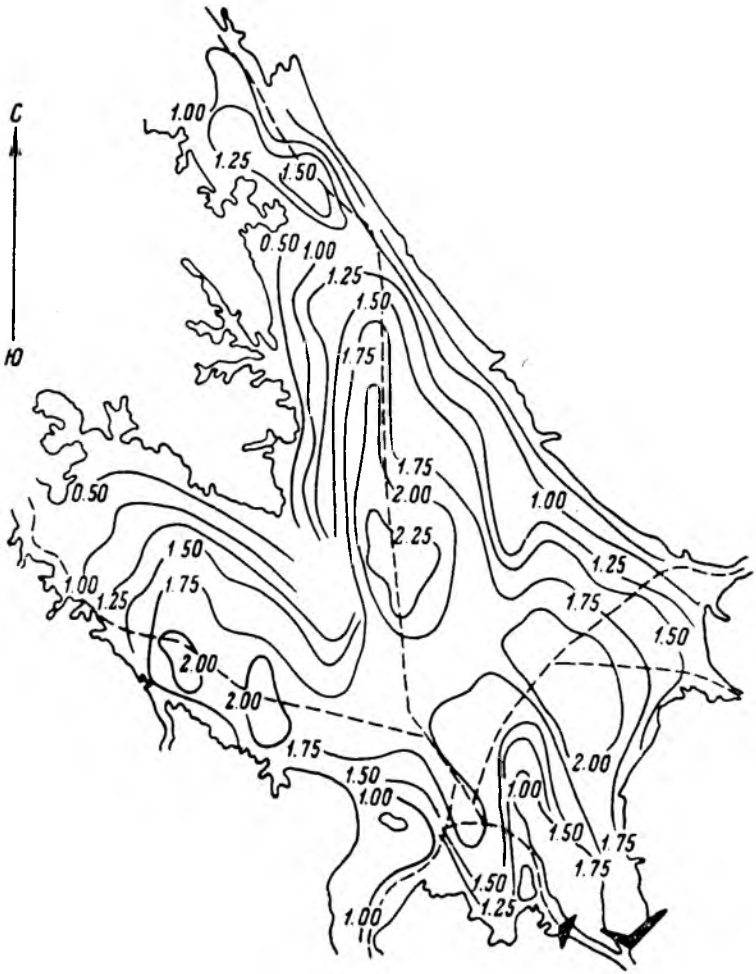


Рис. 9. Картограмма изменений высоты волн (м) в Рыбинском водохранилище при ветре 18 м/сек. северного направления (по: Селюк, 1959).

крутизна волн. Крутизна волны на море обычно не превышает 1 : 20, а волна с крутизной 1 : 13 бывает крайне редко (Иванов, 1948). На крупных же водохранилищах крутизна волны колеблется от 1 : 5 до 1 : 7 для средних и невысоких волн и от 1 : 12 до 1 : 15 для самых высоких волн (Вендров, 1955). Период волн на водохранилищах значительно меньше периода морских волн:

средняя величина периода для низких волн равняется 2—3 сек., а для высоких — 4—5 сек. Поскольку волновые процессы на водохранилищах протекают на фоне значительных сезонных и годовых колебаний уровня, величины элементов волн в них могут существенно меняться.

Течения

Роль течений в гидрологическом режиме водохранилищ, в том числе и в формировании донных отложений, весьма существенна. Являясь одним из основных видов гидродинамической активности водной массы, течения наряду с волнением обусловливают распределение отложений и темпы их накопления.

Искусственное регулирование объема водной массы, форма и морфометрия водохранилищ создают сложную систему течений, в которой преобладают стоковые течения. Они возникают в результате наклона уровенной поверхности водоема, вызванного избытком воды, приносимой притоками, или недостатком ее в той или иной части водоема. Скорости течения в зоне распространения подпора уменьшаются в сравнении с речными условиями, при этом теряется устойчивость направления течения (Буторин, 1963а). Учитывая важную роль течений в формировании и переформировании грунтового комплекса водохранилищ, остановимся несколько подробнее на характеристике их в рассматриваемых водоемах.

Режим течений на отдельных участках Иваньковского водохранилища имеет существенные различия. В узком, вытянутом по руслу Волги Волжском плёсе сохранились особенности режима течений реки в естественном состоянии. Величина скорости их и распространение по длине плёса зависят от соотношения расходов реки и уровня воды в водохранилище. Для весеннего периода, например, чем выше абсолютная высота половодья и ниже уровень водохранилища, тем бо́льшая часть плёса по режиму скоростей течения напоминает реку. Протяженность этого участка зависит от положения границы подпора, которая не остается постоянной. Перемещение границы подпора по длине Волжского плёса показано В. П. Курдиным (1961а) на примере половодья 1953 г. (рис. 10).

В годы с высоким весенним половодьем, какое было в 1953 г., и нормальным уровнем зимней сработки граница выклинивания подпора подходит довольно близко к плотине (рис. 10). Продолжительность же времени, на которое в плёсе устанавливается речной режим течений, на отдельных его участках различна. Так, у бывшего устья Шоши она равна 3 суткам, у дер. Лисицы — около 10, а в 15 км ниже г. Калинина — 48 суткам. Естественно, что в этих пунктах на указанное время грунтовый комплекс плёса подвергается воздействию скоростей течения, определяемых водностью Волги и Тверцы.

Летом, когда уровень водохранилища близок к НПУ, скорости течения в Волжском плёсе заметно уменьшаются. Отдельные измерения скоростей течения у г. Конакова показали, что величины скорости в поверхностном слое достигают 0.16 м/сек., а на траверзе дер. Терехова — 0.15 м/сек. В зоне выклинивания подпора, как и весной, скорости течения выше — 0.30—0.40 м/сек.

Шошинский плёс по проточности уступает Волжскому, так как водообмен здесь в 3 раза меньше, чем в Волжском. Скорости течения в нем в предвесенний период обычно не превышают 0.10 м/сек., а в конце периода наполнения водохранилища в отдельных случаях достигают 0.15—0.16 м/сек. Для весеннего половодья данных по скоростям течений нет, но, поскольку время его совпадает с наинизшими уровнями, скорости течения весной на короткое время должны резко возрастать.

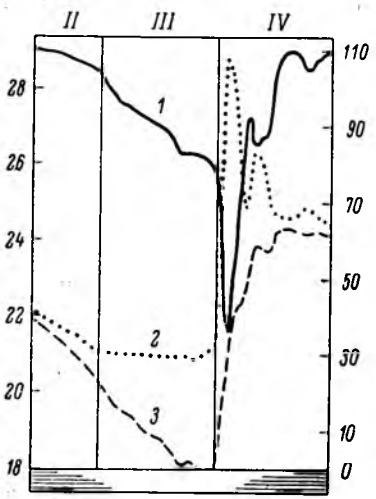


Рис. 10. Перемещение границы подпора в Волжском плёсе Иваньковского водохранилища в половодье 1953 г.

II—IV — месяцы. *1* — граница распространения подпора, *2* — ход уровня воды у Калинина, *3* — ход уровня воды у Конакова. *По оси ординат: слева* — расстояние от плотины, км, *справа* — уровень воды, м усл.

Характер стоковых течений в Иваньковском плёсе зависит от величины и продолжительности сбросов через гидросооружения. Кратковременные попуски независимо от их величины вызывают течения лишь в приплотинном участке, а продолжительные сбросы являются причиной возникновения течений на протяжении всего плёса и даже всего водохранилища.

Представление о проточности Иваньковского плёса можно получить по средним скоростям течения, вычисленным как отношение среднемесячного секундного расхода воды из водохранилища к среднемесячной площади водного сечения выбранного створа. Таким способом В. П. Курдиным (1961а) определено, что скорости течения в наиболее узких местах Иваньковского плёса колеблются от 0.03 до 0.12 м/сек. Это подтверждается и инструментальными измерениями элементов течения. Весной на приплотинном участке Иваньковского водохранилища скорость течения на поверхности обычно не превышает 0.05—0.06 м/сек. Подобные скорости наблюдались в Обуховском, Федоровском и Перетрусовском заливах и сохранялись до Шошинского плёса (Буторин, 1959).

В верхнем бьефе ГЭС в результате неравномерной ее работы в течение суток элементы течения быстро меняются. Так, регистрация течения самописцами БПВ-2р у с. Городища в июле 1963 г. показала, что скорость течения в отдельные сроки наблюдений достигала 0.14—0.16 м/сек. и в течение продолжительных промежутков времени не превышала 0. 03 м/сек. (рис. 11). Поскольку величины сбросов через гидросооружения могут варьировать от 0

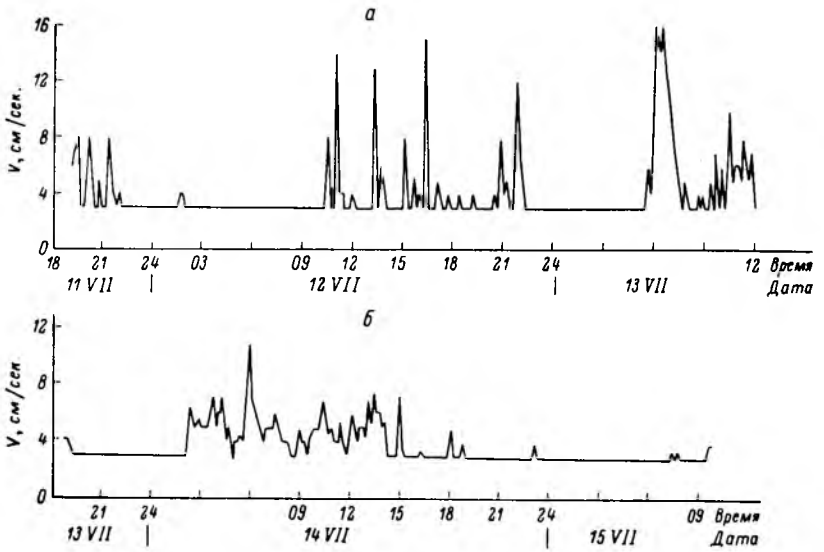


Рис. 11. Изменение скоростей течения в Иваньковском водохранилище в июле 1963 г.

а — верхний бьеф Иваньковской ГЭС, *б* — с. Городище.

до 7500 м³/сек., диапазон изменения скорости течения очень велик. Наименьшие скорости соответствуют времени прекращения попусков через ГЭС и забора воды в канал им. Москвы и близки к нулю. Наибольшие скорости наблюдаются при весенних сбросах, когда водохранилище срабатывается для последующего наполнения талыми водами и в период пропуска весеннего половодья. Продолжительность последнего обычно равна 5—10 суткам. В это время в движение включается водная масса на всем протяжении водоема.

Таким образом, в Иваньковском водохранилище наибольшие скорости течения наблюдаются при пропуске вод весеннего половодья. В Волжском плёсе на участке, временно выходящем из подпора, даже средние суточные скорости в этот период могут быть больше 1.0 м/сек. В Иваньковском плёсе в зависимости от величины сбросов они достигают 0.53 м/сек. (Курдин, 1961а). В Шошинском плёсе скорости течения значительно ниже.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в определенные периоды величины скоростей течения в водохранилище превышают критические, выше которых начинается размыв ранее отложившихся наносов. Это наиболее характерно для Волжского плёса. В верхней части его процессы русловой эрозии наблюдаются каждую весну, а в Иваньковском плёсе — в зависимости от объема половодья. По расчетам В. П. Курдина (1961а), в течение 7 из 19 лет наблюдений в Иваньковском плёсе происходило только отложение наносов, поскольку в эти годы скорости течения были меньше критических, равных для грунтов плёса 0.18—0.24 м/сек.

Значительные скорости течения наблюдаются и в Угличском водохранилище, особенно в период весеннего половодья. В половодье водохранилище имеет черты речного режима, которые наиболее отчетливо выражены на верхнем участке. Для характеристики скоростного режима водоема во время максимального развития стоковых течений, когда они оказывают наибольшее влияние на процессы грунтообразования, рассмотрим динамику скоростей течения по 2 створам — у г. Кимры и в 9 км выше Углича. Первый из них характеризует верхний русловой участок, а второй — нижний долинный участок водохранилища.

Поскольку половодье для водосборов Иваньковского и Угличского водохранилищ практически наступает одновременно, оба гидроузла начинают весенние сбросы почти синхронно. Это позволяет найти средние скорости для интересующих нас створов, пользуясь отношением среднесуточного сброса через сооружения гидроузлов к площади водного сечения створа с учетом изменения последней. Для вычисления скоростей у Кимр в данном случае использовались сбросы Иваньковского, а у г. Углича — Угличского гидроузлов. Результаты расчета среднесуточных скоростей течения за годы с низким (1949 г.) и высоким (1955 г.) половодьем показывают, что средние скорости течения у Кимр больше, чем в приплотинном участке водохранилища. Даже в год с небольшим половодьем у Кимр наблюдаются скорости течения выше 0.24 м/сек., при которых возможен размыв дна (рис. 12).

Продолжительность действия размывающих скоростей стокового течения на рассматриваемых участках различна и меняется от года к году. В год с небольшим половодьем число дней со скоростью, превышающей 0.24 м/сек., у Кимр было 14, а у Углича таковые отсутствовали. При высоком половодье число их у Кимр возрастало до 31, а у Углича равнялось 23.

Для представления о распределении размывающих скоростей в течение года В. П. Курдиным (1963) вычислены максимальные месячные скорости по тем же створам за период 1948—1957 гг. Амплитуда максимальных месячных скоростей для рассматриваемых створов такова, что у Кимр размывающие скорости свыше 0.24 м/сек. могут быть ежемесячно, тогда как на нижнем участке — только при пропуске весеннего половодья и при этом не каждый год (рис. 13).

Таким образом, размыв ложа нижнего и особенно верхнего участков водохранилища стоковыми течениями происходит в половодье. В этот период средние максимальные скорости у Кимр достигают 0.73 м/сек., а у Углича — 0.33 м/сек. Наибольшие максимальные месячные скорости увеличиваются соответственно до 1.12

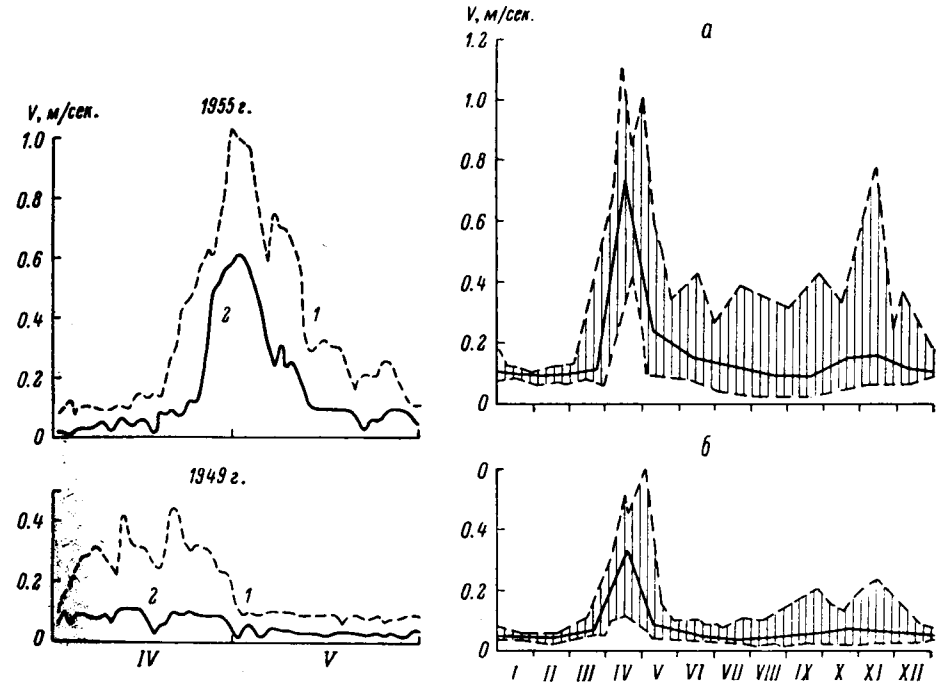


Рис. 12. Средние скорости течения в Угличском водохранилище.

1 — у Кимр, *2* — в 9 км выше Углича.

Рис. 13. Амплитуда колебания максимальных месячных скоростей течения за период с 1948 по 1957 г.

а — створ у г. Кимры, *б* — створ в 9 км выше Углича. *Сплошная линия* — средняя максимальная скорость за период.

и 0.60 м/сек. (Курдин, 1963). При таких скоростях течения на верхнем участке водохранилища в период весеннего половодья во влекомые наносы может входить даже крупный гравий. Более мелкие частицы, в том числе песок, не могут аккумулироваться и переносятся на средний и нижний участки. На нижней части водохранилища смыв частиц грунта, до крупного песка включительно, может происходить только в многоводную весну.

На высокие скорости течения в водохранилище весной указывают и величины уклона водной поверхности. По данным Т. Н. Курдиной (1959), средний уклон водной поверхности на

участке Кимры—Калязин весной равен 0.03‰, на участке Калязин—Углич — 0.02‰. В другие сезоны года уклоны водной поверхности на обоих участках уменьшаются, но не исчезают, и

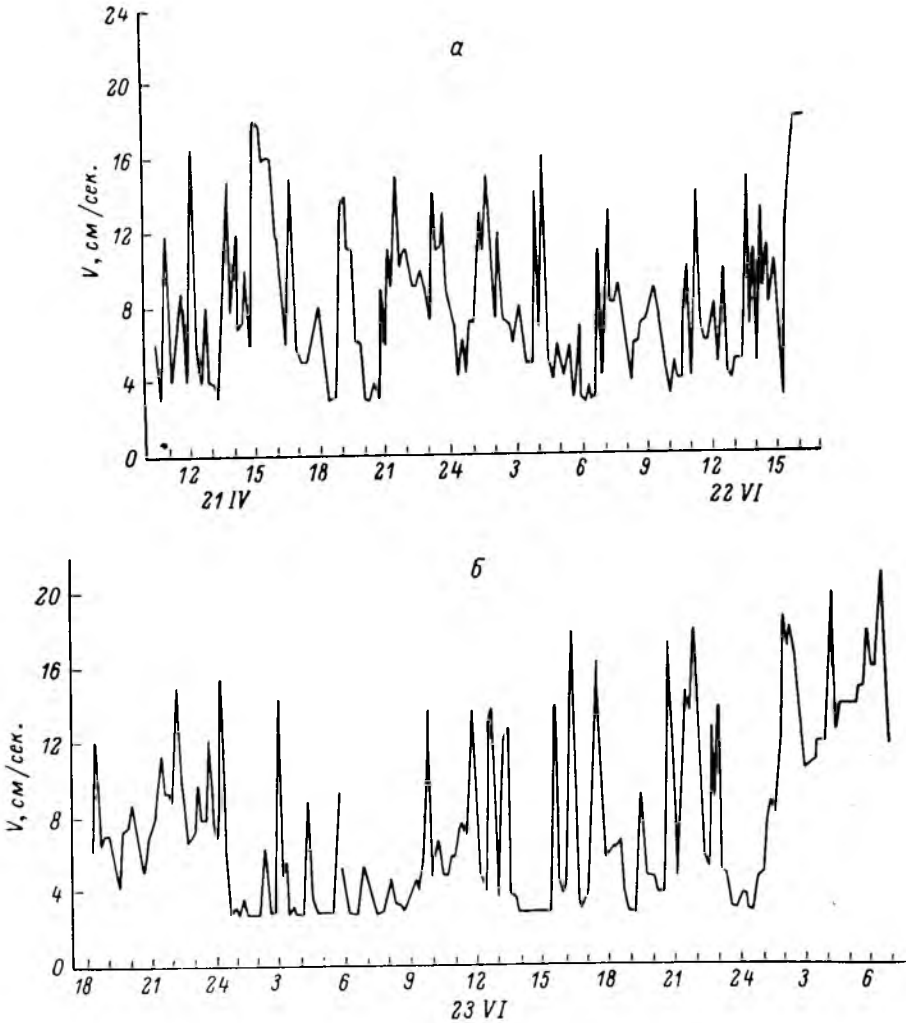


Рис. 14. Изменение скоростей течения по длине Угличского водохранилища. *а* — верхний бьеф Угличской ГЭС, *б* — с. Прилуки, *в* — Калязин, *г* — Кимры.

как следствие течение сохраняется, хотя скорости его заметно уменьшаются.

Скоростной режим Угличского водохранилища зависит от величины расходов и продолжительности работы Угличской и Иваньковской ГЭС. Поскольку величины сбросов и продолжительность

работы ГЭС даже в течение суток изменяются в широких пределах, то и распределение скоростей как по акватории водоема, так и по глубине сильно меняется. Регистрация элементов течения

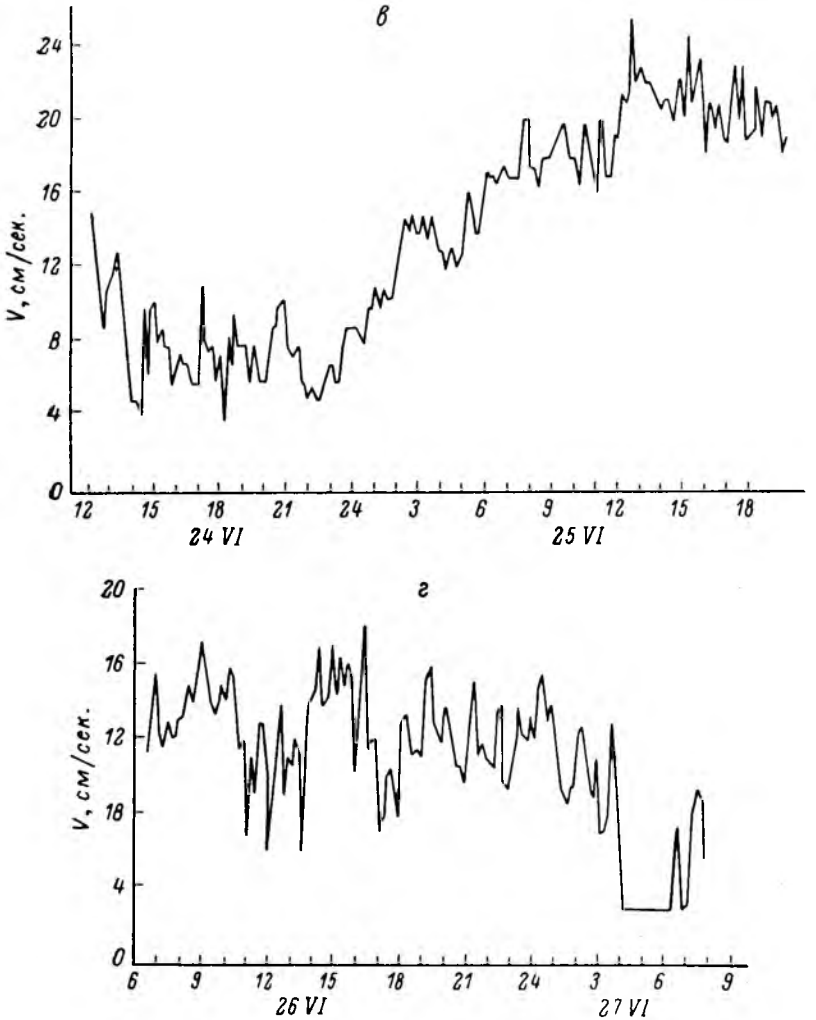


Рис. 14 (*продолжение*).

с 10-минутными интервалами в течение суток и более на ряде вертикалей водохранилища, выполненная в июне 1963 г., показала резкие изменения скоростей в течение суток на всех горизонтах. В некоторых случаях между соседними часовыми отметками они достигают 0.15 и даже 0.22 м/сек., причем наиболее резкие колебания отмечаются на участке водохранилища, примыкающем к плотине Угличской ГЭС (рис. 14).

Особенно сложна картина течений в Рыбинском водохранилище. Стоковые течения в этом водоеме наиболее ярко выражены в зимний период. В водохранилище вдоль русел соответствующих рек отчетливо прослеживаются 3 основных водных потока — волжский, моложский и шекснинский. Эти потоки являются определяю-

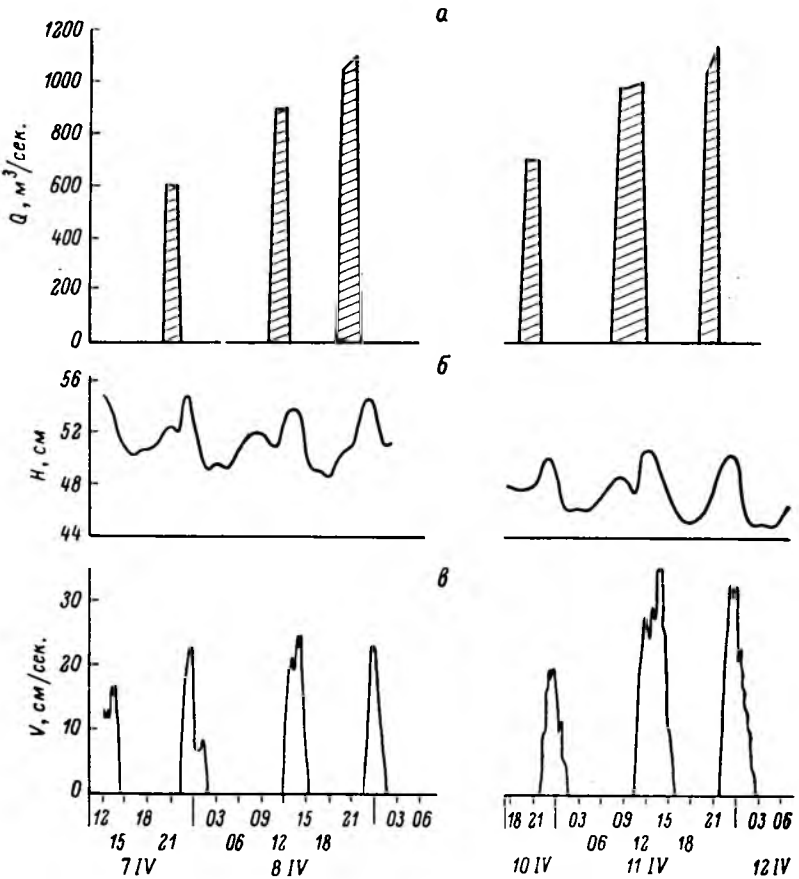


Рис. 15. Сбросы Угличской ГЭС (*а*), уровень воды (*б*) и скорость течения (*в*) в Рыбинском водохранилище у с. Коприно 7—12 апреля 1960 г.

щими в циркуляции вод водохранилища. Наиболее мощный из них волжский поток, представляющий собой воды, сбрасываемые из Угличского водохранилища. Характер и особенности скоростей течения в нем обусловливаются прежде всего режимом работы Угличской ГЭС.

Сброс воды из Угличского водохранилища производится преимущественно через гидростанцию, максимальная пропускная способность которой равна 1200 м³/сек. Поскольку режим работы

Угличской ГЭС зависит от покрытия нагрузок энергосистемы, а энергопотребление имеет резко выраженный суточный ход, то и поступление воды в Рыбинское водохранилище в течение суток весьма неравномерно. Величина среднесуточных расходов колеблется в широких пределах — от 200 до 400 м³/сек. В маловодные

Таблица 4

Скорости течения (см/сек.) на горизонте 0.6 *H* русловых вертикалей волжского потока по наблюдениям 1963 г.

Сроки наблюдений, часы	Пос. Мышкино	Дер. Юрино	С. Коприно	Сроки наблюдений, часы	Пос. Мышкино	Дер. Юрино	С. Коприно	Сроки наблюдений, часы	Пос. Мышкино	С. Коприно
19 III				15 IV				15 V		
18	14.0	11.0	3.0	16	39.5	26.0	4.0	8	6.0	3.5
19	28.5	14.0	3.0	17	39.0	26.0	4.0	9	10.0	3.0
20	32.0	20.5	11.5	18	38.0	24.0	6.0	10	29.0	3.5
21	35.0	27.5	20.0	19	37.0	24.5	6.5	11	29.5	3.5
22	37.5	29.0	24.0	20	36.0	25.0	4.0	12	24.0	6.0
23	39.5	33.0	21.5	21	37.0	25.5	6.0	13	22.0	3.5
24	38.0	30.0	20.0	22	38.0	26.0	4.0	14	17.5	3.0
				23	18.0	24.0	4.0	15	22.5	5.0
20 III				24	11.5	8.5	4.0	16	10.5	3.5
								17	7.5	3.0
1	15.0	29.0	20.0	16 IV				18	5.0	3.5
2	5.0	11.0	17.0					19	5.0	3.5
3	5.0	3.0	3.0	1	5.0	2.5	4.0	20	5.0	3.0
4	6.0	3.0	3.0	2	12.5	3.0	4.0	21	5.0	3.5
5	10.5	9.5	4.0	3	16.0	2.5	4.0	22	28.0	3.5
6	8.5	6.5	7.5	4	15.0	10.0	4.0	23	32.0	3.0
7	5.0	3.0	4.0	5	18.5	11.5	4.0	24	8.0	7.0
8	5.0	3.0	4.0	6	19.0	14.5	4.0			
9	5.0	3.0	4.0	7	21.0	14.0	4.0	16 V		
10	33.0	3.0	4.0	8	20.0	13.5	4.5			
11	36.5	27.0	15.0	9	28.0	16.0	6.0	1	5.0	3.5
12	35.0	30.5	20.0	10	32.5	21.0	7.0	2	5.0	3.0
13	27.0	25.5	24.0	11	35.0	22.5	6.0	3	5.0	3.5
14	22.0	21.0	16.5	12	34.5	23.5	5.5	4	7.5	3.5
15	21.5	16.0	13.5	13	35.5	24.0	6.5	5	6.5	7.5
16	17.5	13.0	9.0	14	37.0	25.5	6.0	6	5.0	9.0
17	15.5	11.5	10.0	15	37.0	25.5	4.0	7	9.5	3.0

годы среднесуточные расходы могут уменьшаться до 20—80 м³/сек.

Естественно, что при таком режиме работы Угличской ГЭС волжский поток не представляет собой постоянного стокового течения (рис. 15). Течение возникает не одновременно по всему руслу Волги (от нижнего бьефа Угличской ГЭС до расширенной части водохранилища) и колеблется по протяженности волжского потока в широких пределах. Это хорошо видно из приведенных

данных по скоростям течения на русловых вертикалях у пос. Мышкина, расположенного в 33 км от Угличской ГЭС, и у с. Коприна, находящегося в 70 км от нее (табл. 4).

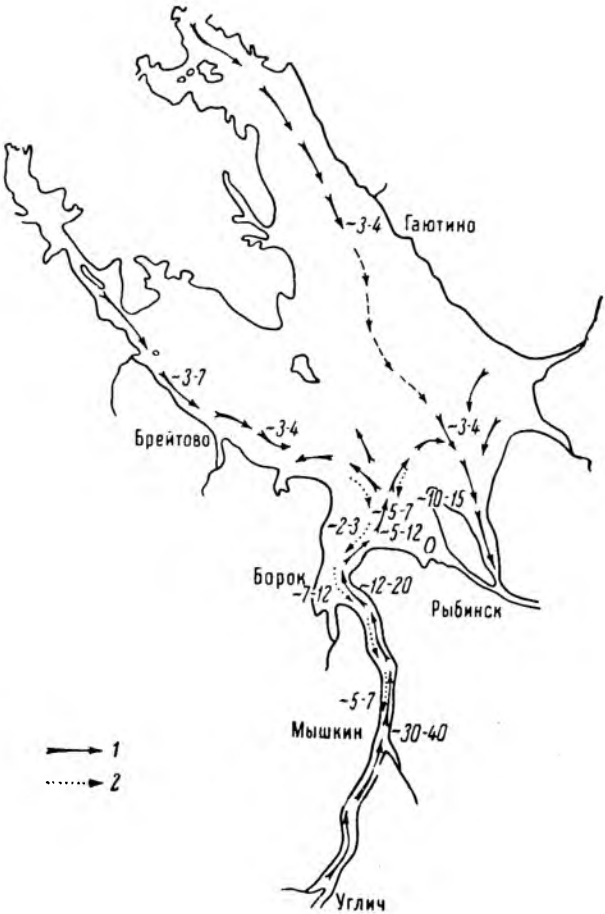


Рис. 16. Схема течений в Рыбинском водохранилище в зимний период.

1 — течение в сторону Рыбинской ГЭС, *2* — течение в обратном направлении. *Цифры* — скорость течения, м/сек.

Несмотря на заметное уменьшение скоростей течения с выходом волжского потока в расширенную часть водохранилища, скорость течения зимой в отдельных случаях даже в районе затопленного г. Мологи достигает 0.10—0.13 м/сек.

Значительно слабее волжского потока выражен в водохранилище поток моложских вод. По мере движения их к открытой части водохранилища скорости течения быстро уменьшаются и уже в районе Первомайских островов и к югу от них слабое те-

чение прослеживается лишь по руслу Мологи. До сооружения Череповецкого гидроузла наиболее слабо в водохранилище выражен был поток шекснинских вод. Скорости течения в нем свыше 0.03 м/сек. отмечались только севернее с. Гаютина.

Центральная часть водохранилища вследствие удаленности от речных потоков Волги, Мологи и Шексны, а также от ГЭС характеризуется слабой проточностью. Перемещение вод в ней не представляет собой направленного стокового течения. Только с приближением к Рыбинской ГЭС в их перемещении появляются черты стокового течения, режим которого определяется характером работы Рыбинской ГЭС.

Зимняя схема стоковых течений (рис. 16) при отсутствии ледяного покрова значительно усложняется наложением ветровых течений. Основные речные потоки и при открытой водной поверхности в общих чертах сохраняют свои особенности. Наибольшие скорости стоковых течений в речных плёсах наблюдаются весной. Во время пропуска через Угличское водохранилище половодья при среднесуточных расходах Угличским гидроузлом порядка 7000 м^3/сек. и более максимальные скорости течения на волжском участке водохранилища могут достигать 1 м/сек. Даже на спаде половодья, во второй декаде мая, скорости течения в Волжском плёсе в отдельные годы могут достигать 0.50—0.70 м/сек. В зависимости от объема половодья и положения уровня водохранилища скорости течения на рассматриваемом участке могут существенно меняться (рис. 17).

С окончанием весеннего половодья и с уменьшением среднесуточных расходов Угличской ГЭС до 30—40 м^3/сек. постоянного стокового течения, как и зимой, на волжском участке водохранилища не наблюдается. При относительно постоянном уровне водохранилища в летний период скорость течения в районе пос. Мышкина колеблется в пределах 0.03—0.10 м/сек., а у с. Коприна обычно ниже 0.03 м/сек. Только с началом сработки Рыбинского водохранилища и некоторым увеличением расходов Угличской ГЭС в осенний период скорости течения на волжском участке снова увеличиваются до 0.55—0.60 м/сек. в нижнем бьефе Угличской ГЭС, 0.10 м/сек. — у с. Коприна.

Аналогичные сезонные изменения в скоростном режиме прослеживаются и на 2 других речных плёсах водохранилища — моложском и шекснинском. В период весеннего половодья проточность их заметно возрастает. Как на Мологе у г. Устюжна, так и на Шексне у дер. Черная Гряда в период весеннего половодья даже средние скорости течения выше 0.50 м/сек. Значения же максимальных скоростей, особенно на Мологе, во многих случаях превышают 1.0 м/сек. Естественно, что с приближением к открытой части водохранилища скорости течения в этих потоках уменьшаются, но даже в районе Первомайских островов по Мологе и у сел. Городища по Шексне в период пика половодья они могут достигать 0.50—0.70 м/сек.

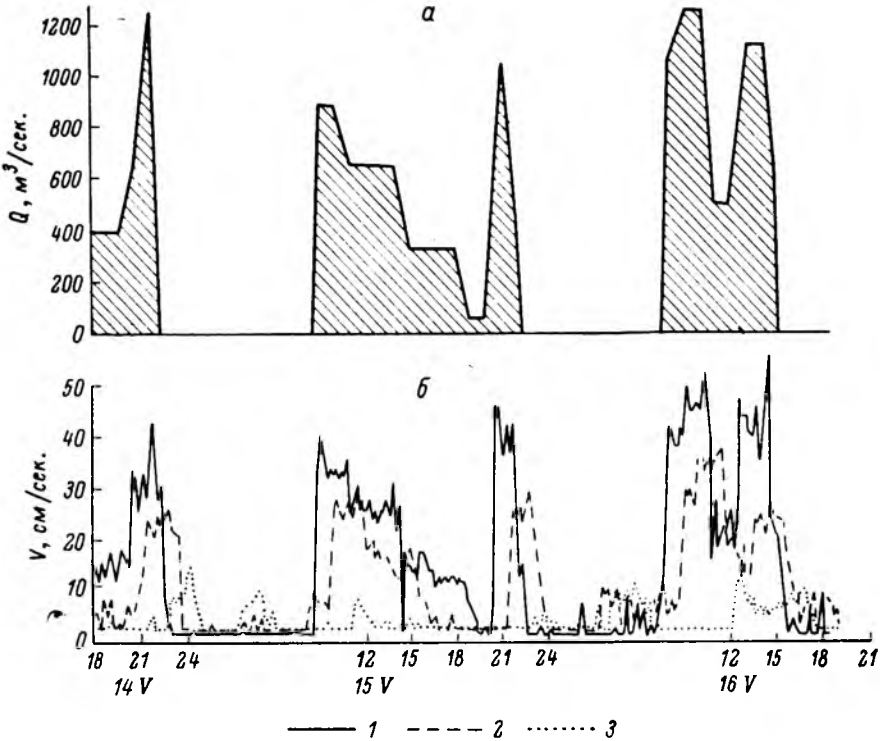


Рис. 17. Сбросы Угличской ГЭС (*а*) и скорость течения (*б*) на волжском участке Рыбинского водохранилища в мае 1963 г.

1 — Углич, *2* — пос. Мышкино, *3* — сел. Коприно.

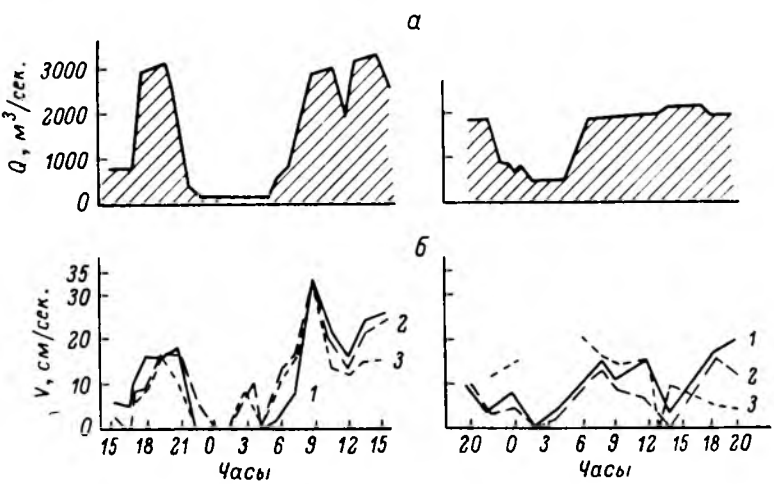


Рис. 18. Сбросы Рыбинской ГЭС (*а*) и скорости течения (*б*) на приплотинном участке Рыбинской ГЭС.

1 — 2-метровый горизонт, *2* — 5-метровый горизонт, *3* — 15-метровый горизонт.

Таким образом, скорости течения в речных плёсах Рыбинского водохранилища весной имеют величины, превышающие критические значения размывающих скоростей и оказывают существенное воздействие на формирование донных отложений, вызывая русловой размыв и препятствуя аккумуляции наносов, приносимых с речными водами.

Продолжительность существования размывающих скоростей течения и распределение их по длине рассматриваемых участков в значительной степени определяются объемом половодья и положением отметки уровня водохранилища. Наблюдения в Моложском плёсе показали, что при высоком уровне водохранилища на спаде половодья скорости стокового течения с выходом потока в расширенную часть водохранилища быстро уменьшаются и ниже устья Ламы не превышают 0.10 м/сек. При низком уровне в маловодные годы проточность плёса выше, и даже у Первомайских островов скорость течения в русле Мологи достигает 0.24 м/сек., а в районе затопленного с. Борисоглеба — до 0.10 м/сек. (Эдельштейн, 1961).

Летом скорости течения в моложском потоке уменьшаются, а с началом сработки водохранилища в осенний период и при значительных дождевых наводках вновь увеличиваются. Осенью в районе устья р. Малиновки отмечались скорости течения порядка 0.25—0.30 м/сек., а у Первомайских островов — до 0.15 м/сек. Следует отметить, что осенью, как и зимой, на режим скоростей течения в этом районе оказывают влияние сбросы воды через Рыбинскую ГЭС. Сопоставляя результаты измерения скоростей течения на траверзе устья р. Малиновки с величиной расходов Рыбинской ГЭС, легко заметить, что скорость течения изменяется в широких пределах, а ее максимальные значения совпадают с максимальными величинами расходов ГЭС.

Отмеченные особенности в изменении скоростей течения в моложском потоке характерны и для шекснинского участка водохранилища. По данным А. Н. Крепке (1958), скорости течения на русловых вертикалях в мае 1955 г. изменялись от 0.26 м/сек. у г. Череповца до 0.12 м/сек. в районе затопленного с. Роя. Как и на других участках водохранилища, минимальные скорости течения здесь наблюдаются в летний период.

Стоковые течения хорошо выражены на приплотинном участке Рыбинской ГЭС. Режим их определяется характером сработки воды из водохранилища, а абсолютные значения зависят от величины расходов ГЭС и положения уровня в верхнем бьефе. При расходах ГЭС порядка 3000 м^3/сек. максимальные скорости течения у дер. Волково могут достигать 0.35 м/сек., а при расходах 400—500 м^3/сек. — лишь 0.05—0.07 м/сек. (рис. 18). Максимальные скорости течения на этом участке, как правило, наблюдаются по руслу Шексны в районе ГЭС. По мере удаления от нее к центральной части водохранилища скорости течения уменьшаются и в 16 км редко превышают 0.15 м/сек. (Буторин, Литвинов, 1963).

При резком уменьшении или прекращении расходов Рыбинской ГЭС и образовании обратной положительной волны (Литвинов, 1968) на приплотинном участке могут возникать течения, направленные от плотины. В этом случае скорость течения в районе дер. Волково обычно не превышает 0.10 м/сек., а продолжительность его составляет 1—2 часа.

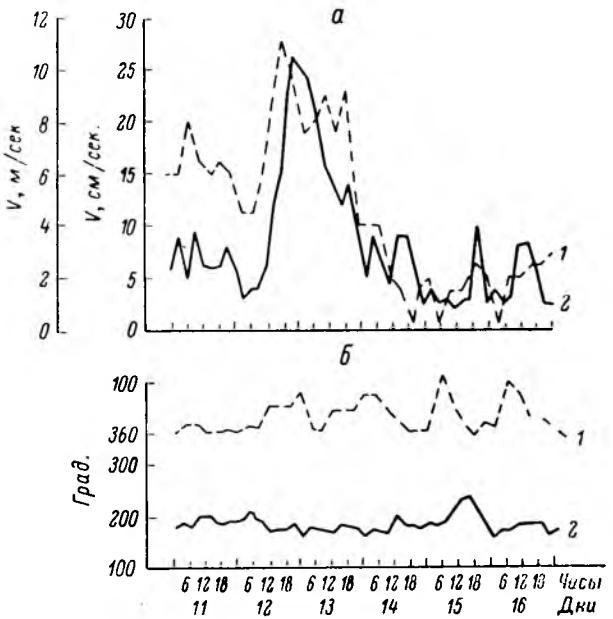


Рис. 19. Скорость (*а*) и направление (*б*) ветра и течения на мелководье Волжского плёса Рыбинского водохранилища.

1 — скорость и направление ветра, *2* — скорость и направление течения.

В открытой части Рыбинского водохранилища слабые стоковые течения на протяжении всего безледного периода перекрываются ветровыми. Последние нарушают нормальное распределение скоростей стоковых течений как в плане, так и по глубине, могут увеличивать вертикальную составляющую скорости и способствовать перемешиванию водной толщи. Ветровые течения в сочетании с волнением сортируют частицы, образующие донные отложения, по весу и крупности и могут транспортировать их на значительные расстояния.

Если в силу морфометрических особенностей Иваньковского и Угличского водохранилищ ветровые течения в них развиваются слабо, то в Рыбинском водохранилище даже при слабых и неустойчивых ветрах отмечается большая подвижность вод. Ветровые течения в летне-осенний период преобладают на всей площади открытой части водохранилища и на пограничных с ней участках.

Мелководность Рыбинского водохранилища, сложный рельеф дна и непостоянство ветрового режима обусловливают сложную систему течений. Однако, как показали исследования А. С. Литвинова (1966), при устойчивых и продолжительных ветрах в результате ветрового течения поверхностные слои воды в водохранилище могут перемещаться на большие расстояния. Так, в конце августа—начале сентября 1965 г. при южном и юго-восточном ветре от 4—6 до 8—10 м/сек. свободноплавающие поплавки за

Таблица 5

Коэффициент вертикального турбулентного обмена (A_τ, г/см·сек.) в зависимости от глубины

Горизонт, м	Скорость ветра, м/сек.			
	5	10	15	20
0	34.9	99.3	165.2	259.5
1	4.5	49.9	93.8	168.2
2	0.7	23.9	51.8	106.0
3	0.06	11.8	29.1	67.5
4	0.0	6.0	15.5	42.6
5	0.0	2.6	8.5	25.8
6	0.0	1.4	4.2	14.3
7	0.0	0.5	2.1	7.5
8	0.0	0.2	0.7	3.1
9	0.0	0.03	0.2	0.8

Примечание. Данные приведены по работе Н. В. Буторина и А. С. Литвинова (1968).

4—5 суток переместились в ряде случаев на 40—50 км. Средняя скорость их движения составляла 0.09—0.13 м/сек.

Данные наблюдений показывают, что в направлении ветра перемещается лишь верхний 2—3-метровый слой воды. Ниже этого слоя течение обычно направлено или под большим углом к направлению ветра, или в противоположную сторону. Таким образом, перемещение вод под воздействием ветра в открытой части водоема весьма изменчиво и определяется одновременным воздействием целого ряда факторов: ветра, стоковых течений, глубины, рельефа дна и очертания берегов, но решающим из них является ветер (Литвинов, 1966).

В отличие от открытой части водохранилища вблизи берегов и на мелководных участках у подветренного берега течение по всей глубине даже при слабых ветрах обычно направлено по ветру. Это хорошо видно по результатам измерения ветрового течения у банки Лысая Гора (рис. 19). Регистрация течения велась непрерывно с 7 августа по 23 сентября 1964 г. самописцем БПВ-2р, который был установлен на глубине 1.8 м при общей глубине станции 2.3 м.

Стоковые и ветровые течения в водохранилищах обусловливают не только перепос водных масс, но и их перемешивание. Интенсивность турбулентного перемешивания характеризуется коэффициентами турбулентного обмена. В Рыбинском водохранилище значения коэффициентов горизонтального турбулентного обмена в поверхностном 5-метровом слое меняются от $0.14 \cdot 10^6$ до $1.92 \cdot 10^6$ г/см в 1 сек.

С глубиной коэффициент турбулентного обмена быстро убывает. При скорости ветра 5 м/сек. уже на глубине 2 м волновое перемешивание практически отсутствует, а при скорости ветра 10 м/сек. оно охватывает значительную толщу и достигает глубины 6 м. С увеличением скорости ветра перемешивание распространяется до дна (табл. 5, рис. 20).

Поскольку повторяемость скорости ветра порядка 6—10 м/сек. даже в многолетнем плане составляет для июня 41%, а в октябре 56% (Зимнова, 1963), открытая часть Рыбинского водохранилища при средней глубине его 5.6 м подвержена частому и интенсивному перемешиванию, которым охватывается практически вся водная толща до дна.

Рис. 20. Изменение коэффициента вертикального турбулентного обмена с глубиной.

I — скорость ветра 5 м/сек., *II* — 10 м/сек., *III* — 15 м/сек., *IV* — скорость ветра 20 м/сек. *По оси ординат* — глубина, м, *по оси абсцисс* — коэффициент вертикального турбулентного обмена, г/см$^{-1}$·сек.$^{-1}$.

Наличие и распространение на значительных участках рассмотренных водохранилищ стоковых течений, проникновение их на значительную глубину и даже до дна создают условия для воздействия энергии движущейся водной массы на донные отложения, в отдельных случаях приводят к размыву дна, а затем к переотложению продуктов размыва. Различия в режиме течений отдельных водохранилищ обусловливают особенности транспортировки и осаждения взвешенного в воде материала. Особенно интенсивное воздействие стоковых течений на некоторые участки дна и на перераспределение речных наносов наблюдается в речных плёсах водохранилищ. На приплотинных участках Иваньковского и Угличского водохранилищ, а особенно в центральной части Рыбинского водохранилища, влияние динамического фактора на условия осадкообразования усиливается под воздействием ветра. Накладываясь на стоковые течения, волнения и ветровые

течения способствуют размыву дна, сортировке донных отложений и их переотложению.

Таким образом, волнение и течения в водохранилищах — основные формы гидродинамической активности водной массы. Понятие «гидродинамическая активность» впервые было выдвинуто М. В. Кленовой (1945). Под ним подразумеваются всевозможные движения воды, от каких бы причин они не происходили, в данной точке или на данном участке водоема. В зависимости от вида и степени гидродинамической активности водной массы поступившие и образовавшиеся в водохранилищах взвешенные вещества транспортируются на более или менее значительные расстояния от места поступления или образования, остаются во взвешенном состоянии или оседают на дно водоема.

Температура воды

Температурный режим, как и особенности гидрохимического режима, — второстепенные факторы, косвенно влияющие на образование и распределение донных отложений в водохранилищах. Температурный режим водохранилищ резко отличается от температурного режима реки. Вскрытие водохранилищ происходит позднее, наблюдаются существенные различия в температуре воды отдельных участков водохранилищ, в зоне подпора отчетливо прослеживается температурная стратификация.

Сокращение безледоставного периода в водохранилищах уменьшает продолжительность волнового перемешивания и создает условия для седиментации взвешенных в воде частиц. Лед, оседающий на дно мелководных участков водохранилищ при их сработке и занимающий в отдельные годы в Рыбинском водохранилище до 50% площади дна, может оказывать существенное механическое воздействие на донные отложения. Неоднородность в распределении температуры воды по акватории водохранилищ влияет на развитие планктонных организмов. Различия в температуре воды отдельных участков водохранилищ могут быть весьма существенными и сохраняются продолжительное время. Так, например, в начале мая 1959 г. температура воды у кромки льда в Рыбинском водохранилище равнялась 1.3—1.7°, а на свободных ото льда участках речных плёсов достигала 9—10°. Еще более существенные различия в температуре воды на отдельных участках наблюдаются в Иваньковском водохранилище (Буторин, Курдина, 1974).

Возникающая в весенне-летний период, а в Иваньковском водохранилище существующая и осенью хорошо выраженная температурная стратификация с большими температурными градиентами обусловливает резкое возрастание плотности воды в слое металимниона и уменьшение скорости осаждения на дно взвесей различного происхождения. В Рыбинском водохранилище разность температуры воды по вертикали в отдельных случаях мо-

жет достигать 15°, а градиент ее в слое скачка — 7° на 1 м глубины (Тачалов, 1959).

Анализ многолетних материалов наблюдений, в частности данных синхронных съемок Рыбинского водохранилища, показал, что температура воды рассматриваемых водохранилищ в годовом цикле сильно меняется. Сезонный ход ее определяется прежде всего метеорологическими условиями. Однако в отличие от естественных водоемов замедленного водообмена на сезонную изменчивость температурных условий в водохранилищах существенное влияние оказывают также антропогенные факторы: искусственное регулирование объема вод, сбросы в водохранилища подогретых вод тепловых электростанций, промышленных предприятий и др. (Буторин, 1969; Буторин, Курдина, 1974).

С сезонной изменчивостью температуры воды в водохранилищах тесно связано развитие в них биологических процессов: сезонных изменений биомассы и продукции фито- и зоопланктона, скорости минерализации продуцируемого органического вещества. Соотношение продукционных и деструкционных процессов в водоеме в значительной степени определяет поступление автохтонного органического вещества в донные отложения.

Химическая характеристика вод

Гидрохимическая характеристика водохранилищ в значительной степени определяется химическим составом вод, поступающих с водосборной площади. При неоднородности распределения тепла и влаги в почвах водосборной площади рассматриваемых водохранилищ сток растворенных веществ с разных частей ее различен. Естественные различия его усиливаются под воздействием антропогенного фактора — сельскохозяйственного освоения территории. Косвенным показателем сельскохозяйственной освоенности территории может служить ее залесенность. В бассейне Иваньковского водохранилища она составляет 39%, Шекснинского — 81%. Водосборная площадь Иваньковского водохранилища в сельскохозяйственном отношении используется значительно интенсивнее, чем Рыбинского. Различное влияние на состав поверхностного стока, а следовательно, и на гидрохимический режим водоемов, естественных и окультуренных почв, особенно при современных формах ведения сельского хозяйства, общеизвестно. Наряду с отмеченными факторами на химический состав вод водохранилищ существенное влияние оказывают промышленные и бытовые стоки. Наиболее ощутимо их влияние в водах Иваньковского водохранилища.

По химическим показателям воды Рыбинское водохранилище отличается от других водохранилищ Верхней Волги (табл. 6). В отличие от Иваньковского и Угличского водохранилищ оно представляет собой относительно устойчивую систему. Химические характеристики воды Рыбинского водохранилища сравни-

Таблица 6

Средние многолетние характеристики химического состава воды водохранилищ Верхней Волги и Рыбинского водохранилища

Водохранилища	$Ca^{\cdot\cdot}$	$Mg^{\cdot\cdot}$	$Na^{\cdot}+K^{\cdot}$	HCO_3'	SO_4''	Cl'	CO_2/Σ_i	$Fe_{общ}/\Sigma_i$	Si/Σ_i	$P(PO_4''')/\Sigma_i$	NO_3'/Σ_i	NO_2'/Σ_i
	% экв.						мг/мг-экв.					
Зима												
Верхневолжские	33.28	13.05	5.09	40.13	9.08	2.23	2.18	0.063	0.386	0.0027	0.116	0.0016
Рыбинское	33.43	12.22	4.24	41.09	7.81	1.19	1.80	0.034	0.303	0.0020	0.101	0.0010
Весна												
Верхневолжские	34.37	11.36	4.26	39.20	9.09	1.70	2.24	0.066	0.573	0.0048	0.201	0.0025
Рыбинское	35.46	10.53	3.88	40.17	8.86	0.83	1.72	0.058	0.474	0.0021	0.154	0.0016
Лето												
Верхневолжские	33.65	11.30	4.81	39.90	8.17	1.92	1.30	0.054	0.387	0.0053	0.097	0.0026
Рыбинское	35.34	11.21	3.45	40.52	8.62	0.86	1.15	0.050	0.339	0.0026	0.100	0.0027
Осень												
Верхневолжские	33.40	11.63	4.96	39.22	8.62	2.15	1.40	0.068	0.329	0.0032	0.108	0.0022
Рыбинское	35.53	10.91	3.55	40.35	8.37	1.01	0.93	0.035	0.245	0.0023	0.116	0.0021
За год												
Верхневолжские	33.33	11.81	4.85	39.45	8.44	2.10	1.64	0.067	0.401	0.0038	0.122	0.0023
Рыбинское	34.75	11.32	3.78	40.66	8.27	0.92	1.45	0.043	0.328	0.0022	0.116	0.0017

тельно слабо изменяется в течение года. Огромная масса воды, поступающая в водоем весной, в дальнейшем, как своего рода буфер, сглаживает колебания, вызываемые различными факторами.

Если в других водохранилищах наименьшая сумма ионов наблюдается весной, то в Рыбинском водохранилище максимум разбавления отмечается только летом. Такое запаздывание обычного для поверхностных вод весеннего минимума минерализации обусловлено медленной сработкой водохранилища и слабым вытеснением зимней водной массы из водоема. В связи с этим воды Рыбинского водохранилища весной по ряду показателей неоднородны, как и зимой (Буторин, Смирнов, 1968).

Рыбинское водохранилище отличается от Иваньковского и Угличского пониженным абсолютным и относительным содержанием ионов щелочных металлов, сульфата и хлора. Это свидетельствует о том, что оно менее загрязнено (табл. 7). Рыбинское

Таблица 7

Средние годовые концентрации ионов щелочных металлов, сульфата и хлора в чистых и загрязненных водах, мг-экв./л

Водоем	$Na' + K$	SO_4''	Cl'
Верхневолжское водохранилище . .	0.09	0.15	0.06
Река Волга у Калинина (верховье Иваньковского водохранилища)	0.12	0.16	0.11
Иваньковское и Угличское водохранилища	0.27—0.54	0.47—0.61	0.11—0.22
Рыбинское водохранилище	0.16	0.35	0.04

водохранилище выделяется также пониженным содержанием свободной углекислоты, железа, кремния и других биогенных элементов (Рыбинское водохранилище..., 1972).

ГЛАВА II

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Данные, использованные нами для харктеристики донных отложений верхневолжских водохранилищ, представляют собой преимущественно материалы грунтовых съемок. Первые грунтовые съемки были выполнены в 1955 г. на Рыбинском водохранилище. Они проводились с целью выяснения распределения донных отложений, выделения их характерных типов и определения основных физико-химических характеристик. При таких съемках станции располагались по площади водоема с таким расчетом,

чтобы охватить наблюдениями все районы и участки и по возможности не оставлять «белых пятен» на дне водоема (рис. 21). Местоположение станций определялось пеленгованием на береговые ориентиры. Помимо станций, обозначенных на схеме, были выполнены многочисленные дополнительные станции в прибрежных участках водохранилища.

Спустя 10—12 лет были выполнены повторные грунтовые съемки водохранилищ, материалы которых позволяют выявить временные изме-

Рис. 21. Схема расположения основных станций грунтовой съемки Рыбинского водохранилища в 1955 г.

нения в грунтовом комплексе, определить пути его дальнейшего развития, а также величины осадконакопления за определенный промежуток времени. Это позволило рассчитать общий объем и вес вторичных отложений, определить темпы седиментации в различных районах и на различных глубинах исследуемых водоемов. Общее количество и характер материалов, полученных в результате грунтовых съемок водохранилищ, приведены ниже (табл. 8).

Все грунтовые съемки водохранилищ выполнялись по единой методике. Пробы грунта отбирались трубкой ГОИНа и дночерпателем Петерсена, при повторных съемках — преимущественно трубкой ГОИНа.

Помимо работ, общих для всех водоемов, на Рыбинском водохранилище проводились исследования формирования рельефа и грунтов мелководий. При обследовании мелководий пробы отбирались на обсохших участках в шурфах, а под водой — трубчатым дночерпателем.

Сразу же после отбора пробы производились измерение высоты слоя вторичных отложений и подробное описание колонки грунта. Пробы консервировались высушиванием на воздухе. Происходящая при высушивании коагуляция мельчайших частиц на результаты гранулометрического анализа заметного влияния не оказывает.

Особенности гидрологического режима и морфометрии отдельных участков водохранилищ и различная степень обеспеченности грунтообразующим материалом обусловили большое разнообразие мощности донных отложений. Поэтому для определения величины осадконакопления каждое водохранилище делилось на участки, в пределах которых однородны морфометрия и гидрологический режим и, следовательно, условия седиментации взвесей (рис. 1—3). Для каждого участка определялась средняя высота слоя отложений в определенных интервалах глубин. Количество измерений для определения средней высоты слоя в данном интервале глубин колебалось от 2—3 до 15—20 в зависимости от характера распределения отложений. Объем материала, отложившегося в каждом интервале глубин, определялся как произведение средней высоты слоя отложений на площадь, занимаемую данными глубинами. Объемы материала, отложившегося на всех глубинах, суммировались, затем определялся общий объем вторичных отложений данного участка. Общий объем вторичных отложений водохранилища равнялся сумме объемов отложений всех участков (Зиминова, Курдин, 1968а). Вес донных отложений вычислялся как сумма произведений объемов различных типов отложений на их объемный вес.

При определении осадконакопления таким способом основным источником ошибок является неравномерное распределение вторичных отложений в заданных интервалах глубин. Вследствие этого средняя высота слоя отложений вычисляется с ошибкой, зависящей от изменчивости высоты

Таблица 8

Материалы грунтовых съемок верхневолжских водохранилищ

Водохранилище	Год	Число станций	Полученные результаты
Иваньковское	1957	228	Распределение донных отложений, их мощность, физико-химические свойства.
	1968—1969	182	Распределение донных отложений, их мощность, объемный вес.
Угличское	1958	115	Распределение донных отложений, физико-химические свойства.
	1967—1968	198	Мощность донных отложений, объемный вес.
Рыбинское	1955—1957	193	Распределение донных отложений, физико-химические свойства.
	1960, 1963, 1965	650	Характеристика рельефа и грунтов мелководий.
	1962, 1965	721	Мощность донных отложений, объемный вес, содержание органического вещества.

отложений на данном участке и от количества сделанных измерений. Ошибки определения площадей, занимаемых данными глубинами, и величин объемного веса различных типов отложений очень невелики и практически не оказывают влияния на конечный результат расчета. Стандартная ошибка величины осадконакопления, рассчитанная как ошибка произведения (средняя высота слоя отложений на площадь), в котором ошибки сомножителей известны, равна 10, 21 и 10% соответственно для Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ.

Кроме описанного способа определения объема и веса донных отложений, для Угличского водохранилища была сделана попытка использовать кривые $h=f(F)$, где h — высота слоя отложений, F — площадь водного сечения. Кривые построены для интервалов глубин 0—9 м и >9 м. По кривым определялся средний слой отложений в пределах выделенных 5-километровых участков. Затем вычислялись объем и вес отложений, которые суммировались для всего водоема. Результаты расчета оказались весьма близкими с полученными первым способом (Курдин, Зиминова, 1972).

При исследованиях рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища производились детальные топографические съемки типичных мелководных участков, дополненные отбором проб грунта. На выбранных участках разбивались профили, точки на которых закреплялись пикетами. Затем производились нивелировки профилей, иногда неоднократно. Нивелировки велись при уровне, близком к наинизшему за год, и позволили построить совмещенные профили дна. По изменению высот точек на них можно судить о направленности процесса формирования рельефа. Сравнение полученных планов участков с крупномасштабной картой 1933 г. дало возможность оценить изменения в рельефе участков за время существования водохранилища и роль открытых мелководий в образовании вторичных отложений.

Для получения физических и химических характеристик грунтов использовались общепринятые методы. Механический анализ грунта производился методом отмучивания—фракциометр—пипетка с выделением фракций: 1—0.5 мм, 0.5—0.2, 0.2—0.1, 0.1—0.05, 0.05—0.01, 0.01—0.005, 0.005—0.001 и меньше 0.001 мм. Ввиду почти полного отсутствия в грунтах минеральных частиц больше 1.0 мм и во избежание измельчения частиц органического происхождения, составляющих значительную часть некоторых отложений, ситовой метод не применялся. Отмучивание производилось только для выделения фракций меньше 0.01 мм. Контроль выделенных фракций под микроскопом показал присутствие в них большого количества частиц больше 0.01 мм. Это явилось следствием подтягивания сифоном слоев суспензии, лежащих ниже контрольной черты, возникновения в ней вихреобразных токов за счет энергичного перемешивания и стекания с поршневой мешалки капель обратно в сосуд. Избежать указанных недостатков удалось при применении пипетки с боковыми отверстиями на нижнем запаянном конце, поршневой мешалки в виде конуса, обращенного вершиной вверх, с диаметром основания на 2—3 мм меньше диаметра сосуда.

Стремление сохранить природный механический состав грунта заставило отказаться от химической подготовки навески к анализу, приводящей к полной дезагрегации частиц. Подготовка к анализу заключалась в замачивании выделенной навески на 2—3 суток дистиллированной водой, осторожном раздавливании оставшихся комочков грунта кисточкой и 30-минутном кипячении. Эти операции устраняли механическое сцепление между частицами грунта, сохраняя их природные размеры. С этой же целью навеска для анализа илистых грунтов, которые при консервации ссыхаются в плотную массу, выделялась из них осторожным откалыванием части взятой пробы. Осреднение пробы в данном случае достигалось тщательным ее перемешиванием перед высушиванием.

При рассмотрении результатов механического анализа следует иметь в виду, что у грунтов с большим содержанием органического вещества

размерность выделенных фракций не соответствует действительной, так как примененная методика рассчитана на минеральные частицы, удельный вес которых больше удельного веса органических частиц. Для таких грунтов можно говорить только о гидравлической крупности частиц органического происхождения, эквивалентной указанному размеру фракций для минеральных частиц.

Определение натуральной и гигроскопической влажности, максимальной молекулярной влагоемкости, проводилось общепринятыми методами (Бруевич, 1944; Наставление..., 1957).

При определении максимальной молекулярной влагоемкости необходимой операцией является прессование образца грунта, при котором часто

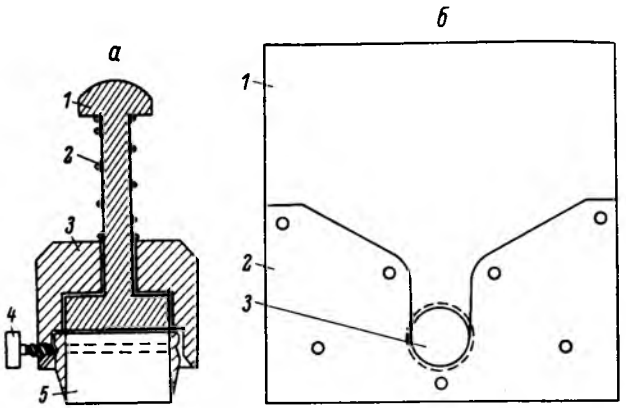


Рис. 22. Отборник проб для определения объемного веса грунта.

а — разрез насадки с поршнем и цилиндриком (*1* — поршень, *2* — возвратная пружина поршня, *3* — насадка, *4* — стопорный винт цилиндрика, *5* — цилиндрик), *б* — план монтажного столика (*1* — рабочая поверхность столика, *2* — направляющая накладка, *3* — приемное отверстие).

наблюдается прилипание волокон фильтровальной бумаги к исследуемому образцу. Очистка образца приводит к изменению его веса и ошибкам в искомой величине. Во избежание этого образцы грунта помещались в однослойные прокладки из марли, а затем заключались между листами фильтровальной бумаги.

Объемный вес донных отложений выражался в 3 формах: 1) объемный вес натуральной влажности (отношение веса образца грунта натуральной влажности к его объему в естественном состоянии); 2) объемный вес воздушно-сухой (отношение веса образца воздушно-сухого грунта к его объему в естественном состоянии); 3) объемный вес абсолютно сухой (отношение веса образца абсолютно сухого грунта к его объему в естественном состоянии). Методика полевых и лабораторных работ при этом заключалась в следующем.

Колонка грунта, полученная с помощью грунтовой трубки ГОИНа, разделялась на 5-сантиметровые отрезки. Отрезок колонки (образец грунта) помещался на монтажный столик (рис. 22), где в образец вдавливался стальной цилиндрик объемом 14 см^3, имеющий режущую кромку. Излишек грунта с верхней части цилиндрика срезался тонким ножом. На цилиндрик надевалась насадка с поршнем, с помощью которого проба переводилась в стеклянный бюкс. Для того чтобы пробу перевести в бюкс, необходимо цилиндрик с насадкой сдвинуть (не приподнимая) по шлифованной поверхности монтажного столика до приемного отверстия, под которое

заранее ставится бюкс. Приемное отверстие для фиксации бюкса в нужном положении с нижней стороны столика имеет направляющий воротничок. Описанное устройство позволяет точно фиксировать объем пробы при отборе, не нарушая ее структуры.

Для устранения потери в весе пробы за счет испарения с ее поверхности (что важно при определении объемного веса натуральной влажности) закрытый бюкс до взвешивания помещается в эксикатор, на дно которого наливается вода. В случае определения объемного веса несчанистого грунта пробу, уже находящуюся в цилиндрике, необходимо капельно смачивать забортной водой до появления на ее поверхности пленки, иначе неизбежны ошибки в определении объемного веса натуральной влажности за счет потери песком капиллярной воды после извлечения его на поверхность. При отборе пробы грунта цилиндрик, насадка и нож должны быть предварительно смочены водой, в противном случае на поверхности пробы могут образоваться нежелательные пустоты.

После первого взвешивания бюкс открывается, проба высушивается на открытом воздухе и бюкс с пробой взвешивается вторично для получения воздушно-сухого объемного веса. Для получения абсолютно сухого объемного веса производились последующие взвешивания с предварительной сушкой пробы в сушильном шкафу при температуре 100—105°.

Для основных типов вторичных отложений было проведено по нескольку определений объемного веса и подсчитана его средняя величина.

Потеря при прокаливании, условно принимаемая за содержание органического вещества в отложениях, определялась общепринятым методом (Аринушкина, 1961). Состав органического вещества анализировался по схеме И. В. Тюрина (1934). В грунтах определялись общий углерод, общий азот, сахара и гемицеллюлозы, клетчатка и лигнино-гумусовый комплекс. Гидролиз проводился по методике, описанной в работе С. И. Кузнецова, Т. А. Сперанской, В. Д. Конпина (1939). Сахара определялись по методу Иссекутца. Лигнино-гумусовый комплекс учитывался как потеря при прокаливании остатков грунта после гидролиза клетчатки. Все перечисленные определения для Рыбинского водохранилища выполнены Ю. И. Сорокиным (1958а). При детальном исследовании содержания азота в различных типах донных отложений Рыбинского водохранилища применялся также микродиффузионный метод Конвея (Трифонова, 1967).

С 1959 г. одновременно с изучением грунтового комплекса ведутся исследования водных взвесей в водохранилищах. Результаты их позволяют дать характеристику и количественную оценку одного из важнейших факторов формирования донных отложений, выразить осадконакопление как функцию соотношения прихода и расхода взвешенного вещества.

Наиболее детальные исследования взвешенных веществ как грунтообразующего материала были проведены на Рыбинском водохранилище. Этот водоем характеризуется, как было показано выше, существенными различиями гидрологического режима отдельных участков. Изучение режима взвесей в разных гидрологических условиях позволило впоследствии распространить результаты этих исследований и на другие водохранилища. Общее число определений количества взвесей в воде этого водоема за 1959—1962гг. превышает 3000 (Зиминова, 1963). Определения количества взвесей производились также при исследовании грунтов мелководий и установлении роли размыва мелководий в формировании вторичных донных отложений водохранилища.

В 1962 г. было проведено изучение режима взвесей Угличского водохранилища (общее число определений — 60), а в 1967—1968 гг. измерялся сток взвешенных наносов в створах Иваньковской, Угличской, Рыбинской, Шекснинской ГЭС, а также сток наносов некоторых малых рек в бассейне Рыбинского водохранилища. В качестве основного метода расчета стока наносов рек применялся метод теоретической кривой обеспеченности (Лебедев, 1955). Коэффициент вариации стока наносов вычислялся по формуле Г. В. Лопатина: $C'_v = 1.6\ C_r$, где C'_v и C_v — коэффициенты вариации стока наносов и воды, рекомендованной Государственным гидрологиче-

ским институтом для расчетов при отсутствии наблюдений над стоком наносов (Практические рекомендации..., 1966). С теоретической кривой обеспеченности стока наносов снимались значения модульных коэффициентов за годы с наблюденным стоком взвешенных наносов. Средний за многолетие расход наносов ($R_{ср}$) определялся по формуле:

$$R_{ср} = \frac{\frac{R_1}{K_1} + \frac{R_2}{K_2} + \ldots + \frac{R_n}{K_n}}{n},$$

где R_n—наблюденные средние годовые расходы наносов,
K_n— соответствующие им модульные коэффициенты,
n— число лет наблюдений над стоком наносов.

Основным источником ошибок при применении метода расчета среднего многолетнего стока взвешенных наносов по теоретической кривой обеспеченности является определение коэффициента вариации стока наносов по соотношению $C'_v = 1.6\ C_r$. Это соотношение определено Г. В. Лопатиным как среднеарифметическое для ряда равнинных рек, имеющих различные величины площади водосбора и расположенных в различных физико-географических условиях. Наблюдения, использованные Г. В. Лопатиным, были довольно непродолжительными. Мы не встречали в литературе проверки данного соотношения для равнинных рек на массовом материале.

Анализ материала, использованного Г. В. Лопатиным (1952), показывает, что средняя ошибка отношения $\frac{C'_v}{C_r}$ достигает 30% за счет ошибок в определении C'_v и C_r. Ошибки коэффициентов вариации стока воды при имеющихся у нас 15—27-летних рядах наблюдений составляют 15—19%. Ошибка в определении коэффициента вариации стока наносов по коэффициенту вариации стока воды определялась как стандартная ошибка произведения $C'_v = 1.6\ C_v$, в котором ошибки средних значений сомножителей известны.

Стандартная ошибка среднего многолетнего стока наносов вычислялась при C'_v, подсчитанном с учетом его положительной ошибки 99%-й обеспеченности. Она равна для Иваньковского водохранилища 12%, для Угличского — 15%, для Рыбинского — 23%.

Результаты расчетов стока наносов рек использованы при составлении балансов взвешенных веществ в водохранилищах. При расчетах широко использовались также материалы, опубликованные в изданиях Гидрометеослужбы, а также количественные характеристики гидробиологических процессов в верхневолжских водохранилищах, содержащиеся в работах сотрудников Института биологии внутренних вод АН СССР.

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

В зимних условиях на Рыбинском водохранилище для сбора взвесей использовался метод ловчих стаканов, позволивший определить темпы седиментации взвесей в этот период (Зиминова, Трифонова, 1963). Метод ловчих стаканов в зимний период свободен от ошибок за счет быстрого

разложения органического вещества и выедания его зоопланктоном, а также за счет вымывания взвесей из стаканов при волнении.

Исследование состава взвесей проводилось по 3 направлениям: 1) определение органического вещества во взвесях, за которое условно принималась потеря при прокаливании; 2) определение общего азота методом Конвея; 3) выявление основных ингредиентов, входящих в состав взвесей путем микроскопирования окрашенных фильтров.

ГЛАВА III

ИСТОЧНИКИ ГРУНТООБРАЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Образование, распределение и темпы накопления донных отложений в водохранилищах определяются прежде всего совокупностью источников, из которых взвешенные вещества, потенциально являющиеся грунтообразующим материалом, поступают в водоем. Источниками взвешенных веществ в водохранилищах, так же как и в естественных внутриконтинентальных водоемах, служат: 1) сток взвешенных наносов рек; 2) размыв берегов и дна; 3) продуцирование фитопланктона и высшей водной растительности; 4) физико-химические процессы в водоеме; 5) эоловые выносы.

Основные особенности питания естественных водоемов грунтообразующим материалом из перечисленных источников в связи с вопросами осадкообразования рассмотрены в работе Н. М. Страхова и др. (1954). Поступление взвешенного материала в водохранилища имеет свои отличительные черты, связанные с самой природой водохранилищ как специфических географических объектов. Для большинства естественных водоемов поступление вещества за счет абразии берегов незначительно в сравнении с величиной твердого стока рек. На водохранилищах, возраст которых насчитывает, как правило, не более 2—3 десятков лет и котловина далека от завершения формирования, процесс абразии берега протекает значительно интенсивнее, чем на озерах той же зоны. Отсутствие на водохранилищах продолжительных периодов устойчивой температурной стратификации и преобладание состояния гомотермии водной массы должны вызвать и изменения в гидрохимических циклах таких элементов, как железо, марганец, фосфор и соответственно в количестве хемогенных взвесей, образующихся в процессе их круговорота. Таким образом, в водохранилищах может быть иное, чем в озерах, соотношение различных генетических типов взвесей, поступающих в донные отложения. Это обусловливает иной характер и темп накопления донных отложений в водохранилищах, для определения которого необходима количественная оценка поступления взвешенного вещества из главнейших его источников.

Из перечисленных выше источников грунтообразующего материала главнейшие для всех верхневолжских водохранилищ — сток взвешенных наносов рек, размыв берегов и дна, развитие фитопланктона и высшей водной растительности. Образование хемогенных взвесей и эоловые выносы, по-видимому, не имеют существенного значения. Карбонатообразовательный процесс, являющийся обычно источником хемогенных взвесей, почти исключается, так как карбонатная система водохранилищ далека от состояния равновесия (Рыбинское водохранилище..., 1972). Некоторое значение может иметь процесс вымывания из грунта закисных солей железа с последующим их окислением и выпадением из раствора в форме гидратов окиси железа. В отличие от евтрофных озер, где появление гидратов железа в воде приурочено к периодам весенней и осенней циркуляции, в водохранилищах гидраты железа присутствуют во взвесях в течение всего года и наблюдается уменьшение их содержания от речных участков к озерным расширенным частям водохранилищ (Зиминова, 1965). Это дает основание полагать, что в основном взвешенные формы железа приносятся с речным стоком, а процесс образования их в самом водоеме имеет подчиненное значение. Возможно, насыщенность придонных горизонтов кислородом, обусловленная частыми ветровыми перемешиваниями, приводит к тому, что диффундирующие к поверхности отложений закисные соединения железа окисляются без перехода во взвешенное состояние, как это имеет место в олиготрофных озерах (Кузнецов, 1970). Благодаря значительной залесенности и задерновапности бассейна рассматриваемых водохранилищ роль эоловых выносов как источника грунтообразующего материала ничтожна. Рассмотрим главнейшие источники поступления взвешенного вещества в водохранилища.

Сток взвешенных наносов рек

По стоку взвешенных наносов реки бассейна верхневолжских водохранилищ относятся к зоне мутности, не превышающей 25—50 г/м^3 (Лопатин, 1952; Шамов, 1959). Сведения о фактическом стоке взвешенных наносов рек весьма малочисленны. Продолжительность наблюдений в большинстве случаев не превышает 5 лет. Исключение составляет Волга у г. Ржева, где ряд наблюдений над взвешенными наносами имеет продолжительность 20 лет (1949—1968 гг.). По данным этого створа и дается характеристика режима стока взвешенных наносов Верхней Волги.

Средняя многолетняя мутность воды Волги у г. Ржева за указанный период равна 13.5 г/м^3, а расход взвешенных наносов составляет 1.29 кг/сек. Внутригодовой ход мутности и расхода наносов типичен для большинства равнинных рек средней полосы Советского Союза. Максимальная мутность наблюдается в период весеннего половодья, затем она резко уменьшается и сохраняет небольшую величину летом. Осенью вновь происходит некоторое

увеличение мутности при прохождении осенних паводков. Зимой наблюдается минимальная мутность. Внутригодовые изменения расходов взвешенных наносов аналогичны изменениям мутности. Пределы колебаний годовых величин мутности и расхода наносов за указанный период равны соответственно 3.4—34.6 г/м^3 и 0.15—3.5 кг/сек., коэффициент вариации годового стока наносов 0.61.

Годовой ход мутности боковых притоков верхневолжских водохранилищ в общих чертах аналогичен описанному. Различия наблюдаются в величинах весеннего и летне-осенних пиков и во времени их наступления. Средние многолетние мутности отдельных рек в пределах бассейна, вычисленные методом теоретической кривой обеспеченности, колеблются от 4 до 74 г/м^3 для водосборов с площадями 469—19 400 км^2 при колебаниях многолетнего модуля стока от 5.5 до 9.8 л/сек. на 1 км^2, залесенности — от 15 до 78%, заболоченности — от 0 до 21% площади водосбора. Немногочисленность обследованных створов не позволяет пока выделить основной физико-географический фактор, определяющий величину мутности при элиминировании всех прочих условий. Площадь водосбора, охваченная наблюдениями над стоком взвешенных наносов, составляет около 48% общей площади бассейна всех верхневолжских водохранилищ, из них непосредственно на Волгу приходится около 8%. Вследствие этого общий сток взвешенных наносов в водохранилища определялся расчетным путем.

Приводимые ниже значения среднего многолетнего стока наносов рассчитаны для бассейна Иваньковского водохранилища за период 1937—1968 гг., Угличского — 1940—1968 гг., Рыбинского — 1941—1965 гг.

Сток речных наносов в Иваньковское водохранилище рассчитан как сумма стока наносов Волги и боковых притоков (Зиминова, Курдин, 1970). При определении стока наносов Волги у г. Калинина вычислялась средневзвешенная для данного водосбора многолетняя мутность с использованием данных инструментальных наблюдений над стоком наносов в створах Волга—Ржев, р. Тьма—с. Новинки, р. Касня — с. Субботники, Осуга—дер. Коротнево. Сток наносов рек Тверцы и Ламы вычислялся по средней многолетней их мутности соответственно в створах сел. Медного и Егорья. Средняя многолетняя мутность малых рек, на которых наблюдения над стоком наносов отсутствуют, принята равной мутности р. Тьмы, на водосборе которой показатели заболоченности, залесенности, распаханности близки к средним для малых рек бассейна водохранилища.

Как видно из приведенных данных (табл. 9), средний многолетний сток взвешенных наносов в Иваньковское водохранилище за исследуемый период составлял 195.3 тыс. т, при этом около 56% общего стока речных наносов приходится на сток взвешенных наносов Волги. Суммарный же сток речных наносов в водохранилище за это время составил 6250 тыс. т.

Сток взвешенных наносов в Угличское водохранилище опре-

Таблица 9

Средняя многолетняя мутность и сток взвешенных наносов притоков Иваньковского водохранилища

Река	Водный сток, млн м³	Мутность, г/м³	Сток наносов, тыс. т
Волга	5491	19.8	108.7
Тверца	2209	18.7	41.3
Шоша	549	22.8	12.5
Лама	404	46.3	18.7
Остальные притоки	620	22.8	14.1
Всего	9273	—	195.3

деляется поступлением их из Иваньковского водохранилища и боковых притоков. Наблюдения над мутностью воды проводились в течение 1968 г. Средняя многолетняя мутность в створе Иваньковского гидроузла определена по методу теоретической кривой обеспеченности. Применение этого метода при расчетах зарегулированного стока, на наш взгляд, допустимо по следующим соображениям. Максимальные величины мутности, так же как и максимальные величины стока наносов в створах плотин Иваньковской и Угличской ГЭС, наблюдаются в период половодья. Вследствие малых объемов этих водохранилищ бо́льшая часть половодья проходит через них транзитом и колебания годового стока в створах этих ГЭС, определяемые главным образом колебаниями весеннего стока, характеризуются такими же коэффициентами вариации, что и колебания стока незарегулированных рек бассейна.

По полученной кривой обеспеченности модульных коэффициентов стока наносов и известной величине обеспеченности модульного коэффициента в год наших наблюдений определены его значение и величина нормы стока наносов, оказавшаяся равной 5.35 кг/сек. Средняя расчетная многолетняя мутность в створе плотины Иваньковской ГЭС составляет 21.8 г/м³, средний многолетний сток наносов равен 169 тыс. т. При таком среднемноголетнем стоке наносов суммарное поступление их из Иваньковского водохранилища за 1940—1968 гг. оценивается в 4900 тыс. т.

Данные о стоке наносов боковых протоков Угличского водохранилища практически отсутствуют. Материалы имеются лишь для створа р. Дубна—с. Вербилки за период 1965—1966 гг. В связи с отсутствием наблюдений над мутностью сток наносов боковых притоков определен расчетным методом. В данном случае использован метод аналогии. За среднюю многолетнюю мутность притоков принималась мутность рек, расположенных в бассейнах Иваньковского и Рыбинского водохранилищ и характеризующихся

сходством основных условий, определяющих величину мутности (водность, величина площади бассейна, заболоченность, залесенность, уклоны). Для определения водного стока была использована несколько видоизмененная схема, примененная Т. Н. Курдиной (1959) при водно-балансовых расчетах. Сток с неизученной площади бассейнов рек Дубны, Нерли, Медведицы определялся по модулям этих рек в створах, замыкающих площадь с инструментальными наблюдениями. Сток с бассейнов малых рек, ручьев и межбассейновых пространств, следуя рекомендациям В. Н. Колкутина (1966), учитывался по модулям стока р. Малицы (бассейн Волги, приток р. Межурки, площадь водо-

Таблица 10

Средняя многолетняя мутность и сток взвешенных наносов притоков Угличского водохранилища

Река	Водный сток, млн. м³	Мутность, г/м³	Сток наносов, тыс. т
Волга	7745	21.8	169
Дубна	962	38.2	37
Нерль	675	6.4	4
Медведица	1168	18.7	22
Остальные притоки	465	31.6	15
Всего	11015	—	247

сбора у замыкающего створа 10.9 км²), отличающейся значительной изменчивостью стока внутри года.

Для расчета среднего многолетнего стока наносов р. Дубны была взята ее средняя многолетняя мутность в створе с. Вербилки. Сток наносов р. Нерли рассчитывался по мутности р. Волчины в створе Волчинское лесничество, р. Медведицы — по р. Тверце в створе с. Медное, малых рек — по р. Юхоти в створе с. Глоднево. Средняя многолетняя мутность рек-аналогов определена методом теоретической кривой обеспеченности. Как видно из приведенных расчетов (табл. 10), первое место по величине годового стока наносов среди боковых притоков занимает Дубна, затем идут Медведица и Нерль. В соответствии с этим находятся и размеры конусов выноса при впадении этих рек в Угличское водохранилище.

Ежегодные величины стока наносов по всем рекам рассчитаны за период 1954—1964 гг. Сравнение общего годового стока в водохранилище, величина которого за 1940—1968 гг. оказалась равной 7160 тыс. т, со стоком наносов в створе Иваньковской ГЭС показало, что последний составляет в среднем 70% от общего с колебаниями от 63 до 78%. Полученное среднее соотношение и

было использовано при вычислении ориентировочных величин общего стока наносов за периоды 1942—1953 и 1965—1968 гг.

Подсчет стока взвешенных наносов в Рыбинское водохранилище произведен по той же схеме, что и подсчет стока воды при составлении водного баланса (Рутковский, Курдина, 1959). По

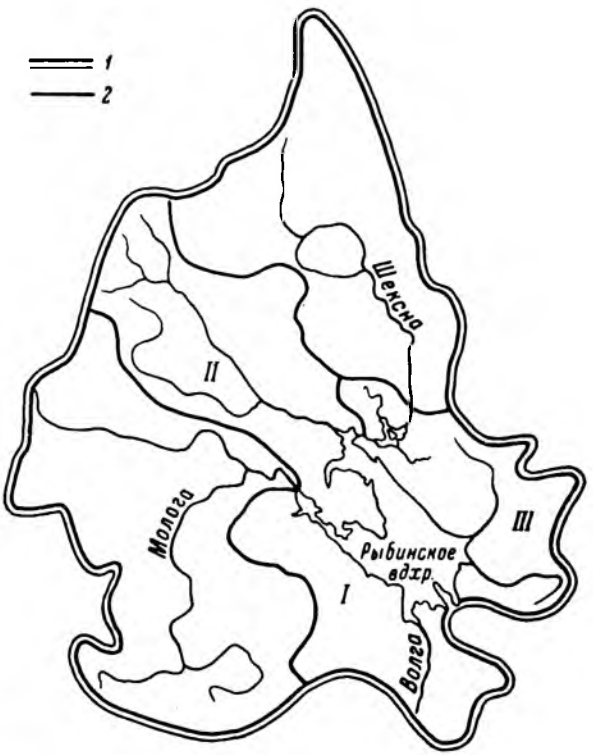


Рис. 23. Деление водосбора Рыбинского водохранилища на районы (*I—III*), для которых рассчитывался сток взвешенных наносов.

1 — граница водосбора Рыбинского водохранилища (без водосбора Угличского водохранилища), *2* — граница районов.

3 основным притокам — Волге, Мологе, Шексне — расчет выполнен соответственно для створов Угличская ГЭС, с. Леонтьево, дер. Черная Гряда, являющихся верхними границами речных плёсов водохранилища. Остальная часть бассейна по характеру четвертичных отложений и величинам модуля стока разделена на 3 района (рис. 23). Первый район включает водосборы рек между Волгой у плотины Рыбинской ГЭС и Мологой. В этом районе преимущественно распространены покровные суглинки и супеси и хорошо развита речная сеть. Во втором районе, включающем пространство между Мологой и западным водоразделом

Ягорбы, значительная площадь занята торфяниками и песками озерного происхождения. Третий район занимает пространство между западным водоразделом р. Ягорбы и Волгой у Рыбинской плотины. Четвертичные отложения здесь те же, что и в первом районе, но с заметным преобладанием суглинков. Этот район отличается также большей увлажненностью и как следствие большими модулями стока. Ландшафтные различия выделенных районов в пределах Ярославской обл. отмечены В. К. Дегтеревским (1958). Таким образом, можно считать, что приведенное деление водосбора на районы учитывает основные факторы водной эрозии и может быть принято при расчетах стока взвешенных наносов.

Сток взвешенных наносов в створе Угличского гидроузла измерялся в 1967 и 1968 гг. Средние годовые расходы взвесей за эти годы, рассчитанные по хронологическому графику мутности и ежедневным расходам воды, равны соответственно 2.14 и 4.54 кг/сек. Оба указанные года характеризовались высокой обеспеченностью водного стока. Средний многолетний расход взвесей, полученный по методу теоретической кривой обеспеченности, равен 6.94 кг/сек., годовой сток — 219 тыс. т, мутность — 19 г/м^3.

Наблюдения над стоком наносов Мологи проводились у г. Устюжны в течение 7 лет. По единичным измерениям расходов взвешенных наносов у с. Леонтьева, величины мутности в этом пункте близки к таковым у г. Устюжны. Впадение Чагодощи не оказывает, видимо, существенного влияния на мутность Мологи и при расчетах стока наносов мутность у с. Леонтьева была принята равной ее показателям у г. Устюжны. Средняя многолетняя ее величина равна 6.4 г/м^3. Средний многолетний сток взвешенных наносов Мологи у с. Леонтьева равен 43.2 тыс. т (Зиминова, Курдин, 1970).

По величине среднегодовой мутности на первом месте среди основных притоков Рыбинского водохранилища стоит Шексна, несмотря на то что условия для развития водной эрозии в ее бассейне менее благоприятны, чем в других частях водосбора водохранилища (большая увлажненность, преобладание в четвертичных отложениях валунных суглинков и глин, а в почвенном покрове подзолистых почв глинистых и суглинистых разностей). Причина такого несоответствия заключается в наличии в истоке Шексны мелководного Белого озера, глинистые илы которого, занимающие большую часть его профундали, при взмучивании значительно обогащают воду взвесями (Курдин, 1960а).

Годовой расход взвешенных наносов Шексны у с. Черная Гряда был определен в 1950 и 1951 гг. и равнялся соответственно 2.8 и 6.8 кг/сек. (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1967). Средний многолетний расход, по нашим расчетам, равен 7.2 кг/сек. Средний годовой сток наносов Шексны в Рыбинское водохранилище до 1963 г. составлял 227 тыс. т. Внутригодовое распределение стока наносов Шексны и годовой ход мутности характеризовались в отличие от большинства равнинных рек

повышенными величинами в течение всего летне-осеннего периода в связи с указанной выше особенностью ее питания.

В 1963 г. на Шексне было создано Шекснинское водохранилище, осуществляющее сезонное регулирование стока. Водохранилище наполняется водами весеннего половодья. В течение мая—июня часть половодья сбрасывается. В летнее время сбросы либо отсутствуют, либо бывают очень незначительны. Поздней осенью и зимой производится предполоводная сработка водохранилища. Такое перераспределение стока в створе гидроузла вызвало существенные изменения в режиме скоростей в верхнем бьефе и как следствие — изменения в режиме и величинах стока

Таблица 11

Средняя годовая мутность рек первого района в 1967 г.

Река-пункт	Площадь водосбора, км²	Залесенность, %	Мутность, г/м³
Суножка—Дьяконово . . .	8	47	13.2
Латка—Чурилово	35	26	20.7
Ильдь—Спас-Ильдь	185	33	37.4
Юхоть—Глодцево	469	62	17.9
Реня—Любер	523	49	19.9
Корожечна—Сумы	1550	28	9.2

наносов, поступающих в Рыбинское водохранилище. Годовой коэффициент водообмена, косвенно характеризующий проточность водоема, в Шекснинском водохранилище равен 0.9, т. е. значительно меньше, чем во всех прочих верхневолжских водохранилищах (Ершова, 1968). Ослабление транспортирующей способности потока в речной части водохранилища вызвало заметное уменьшение мутности шекснинских вод.

Наблюдения над мутностью воды в верхнем бьефе Шекснинской ГЭС, в непосредственной близости от плотины, проводились в мае—октябре 1965 г. во время экспедиционных рейсов. В 1967 г. пробы отбирались в водоводах ГЭС в течение всего года. Наблюдения в летний период 1965 и 1967 гг. дали близкие величины мутности. Средняя годовая мутность в 1967 г. равнялась 4.1 г/м³, а годовой расход наносов составил 0.62 кг/сек. Средняя годовая мутность 1967 г. и использована при расчетах стока наносов в Рыбинское водохранилище за период 1963—1965 гг. Он равен 42.2 тыс. т.

Данные по стоку наносов малых рек в пределах первого района (рис. 23), а также в смежном бассейне Мологи, имеющем сходные физико-географические условия, показывают, что средняя годовая мутность их значительно колеблется в зависимости от сочетания 2 факторов — площади водосбора и его залесенности (табл. 11).

С учетом этих двух факторов все реки первого района были разбиты на пять групп и для каждой группы был принят аналог, по которому имелись наблюдения над стоком наносов. Затем для всего района была определена средняя мутность (средневзвешенная относительно площади) — 12.5 г/м³ и годовой сток наносов — 21.2 тыс. т. Многолетняя величина стока наносов, определенная тем же методом, что и для основных притоков, оказалась равной 40.8 тыс. т.

Сведения о стоке наносов во втором районе имеются по р. Суде в створе Куракино. Различия в мутности воды у дер. Ку-

Таблица 12

Средняя многолетняя мутность и сток взвешенных наносов притоков Рыбинского водохранилища

Река	Водный сток, млн. м³	Мутность, г/м³	Сток наносов, тыс. т
Волга	11460	19.0	219
Молога	6750	6.4	43
Шексна:			
до 1963 г. . .	5424	41.8	227
после 1963 г.	3465	4.1	14
Реки:			
I района . . .	2631	15.5	41
II района . .	6033	8.1	49
III района . .	2793	74.0	207
Всего:			
до 1963 г. . .	—	—	786
после 1963 г.	—	—	573

ракино и в устье реки невелики. Поскольку бассейн р. Суды занимает около 82% всей площади второго района, а сток составляет 80—90% стока района, ее мутность принята для расчета стока этого района. Результаты расчетов показали, что средний многолетний сток наносов р. Суды равен 48.9 тыс. т.

Аналогичные расчеты были произведены для третьего района. Средняя годовая мутность малых рек его принята равной среднегодовой мутности р. Согожи у с. Родионки. Средний многолетний сток наносов составил 207 тыс. т.

Произведенные расчеты позволили определить суммарный годовой сток наносов в Рыбинское водохранилище. До создания Шекснинского водохранилища он составлял 786 тыс. т, а после его образования — 573 тыс. т (табл. 12). Общий сток наносов в водохранилище за период 1941—1965 гг. равен 19 000 тыс. т.

Бо́льшая часть стока речных наносов (от 70 до 90%) поступает в верхневолжские водохранилища в весенний период. Модуль стока наносов для бассейна водохранилищ колеблется в узких пределах — 4—5 т/км² в год.

Размыв берегов и дна

Абразионная деятельность водной массы водоема приводит к переформированию его берегов и размыву дна мелководных участков. Отмечая основную роль переформирования берегов в заносимости крупных равнинных водохранилищ, исследователи обычно игнорировали второе следствие абразионной деятельности водоема — размыв участков дна, расположенных выше уровня размывающего действия волнения. Лишь в последнее время появились указания на необходимость учета этого фактора (Вендров, Стеженская, 1969) и делаются попытки его ориентировочной оценки (Широков, 1969).

Исследованиями Н. А. Зиминовой и В. П. Курдина (1968б) на примере Рыбинского водохранилища показано, что количество автохтонного взвешенного вещества, образующегося в результате размыва таких участков, может быть сопоставимо с количеством вещества, поступающего в водоем при абразии берега, а в некоторых случаях, при определенном сочетании морфометрических и геолого-геоморфологических условий, может, по-видимому, его превосходить. Ограниченность имеющегося фактического материала затрудняет количественно оценить оба эти процесса и вынуждает идти по пути определения их суммарного результата па основе балансовых расчетов. Однако некоторые ориентировочные оценки, основанные па характере режима и морфометрии водоема, могут быть в каждом случае сделаны.

Берега Иваньковского водохранилища в меньшей степени подвержены абразии, чем берега других водохранилищ каскада. В большинстве случаев они развиваются по аккумулятивному или нейтральному типу. Участки, на которых происходит абразия берега, имеют малую протяженность (около 3% от общей длины береговой линии) и расположены в основном в Волжском плёсе. Из-за небольших размеров волнения переработка их идет слабо. По данным справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР» (1974), отступление сложенного песками берега у дер. Городище к 1964 г. составило 50 м. В последующие три года отступления берега не наблюдалось. В другом пункте наблюдений — дер. Терехове — берег, сложенный тяжелыми суглинками, за все время существования водохранилища не подвергался существенным деформациям. Значительная часть берегов озеровидных плёсов водохранилища окаймлена полосой высшей водной растительности, гасящей волнение и препятствующей абразии берега. Все это свидетельствует о небольшой роли береговой абразии как фактора образования автохтонного взвешенного вещества по крайней мере в настоящее время. Однако никаких количественных показателей этого процесса не имеется. Вместе с тем Иваньковское водохранилище — мелководный водоем, имеющий обширные озеровидные плёсы. Как было показано выше, размывающее действие волнения распространяется в Шошинском и Иваньковском

плёсах водохранилища до глубин соответственно 2.7 и 4 м от НПУ, занимающих около 50% площади дна. Зарастание части мелководий растительностью снижает интенсивность донной абразии и уменьшает размеры площади, подверженной размыву. Однако формирование рельефа дна и грунтов мелководий предшествует зарастанию литорали, которое в Иваньковском водохранилище произошло на 5—10-м году его существования (Гусева, Экзерцев, 1966). В связи с этим можно полагать, что в первые годы существования водохранилища образование взвесей за счет размыва мелководий было более значительным, чем в настоящее время. Однако завершение формирования рельефа мелководий означает достижение динамического равновесия. Поэтому и в настоящее время при ветроволновых ситуациях низкой повторяемости мелководные участки служат источником автохтонных взвесей. Доказательством этого являются эпизодические повышения мутности воды в створе Иваньковской ГЭС по сравнению с величинами, наблюдающимися на входных створах водохранилища при усилении ветроволновой активности (Зиминова, Курдин, 1970). Все это позволяет считать, что в этом водохранилище размыв дна — преобладающая форма абразионной деятельности водной массы.

Протяженность абразионных берегов Угличского водохранилища, по обследованиям Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, равна 86 км, или 13% от общей длины береговой линии. По наблюдениям на участках дер. Красное и Васнсино, суммарные объемы обрушенного грунта за период 1939—1964 гг. составили 87.5 и 69.5 м^3 на 1 пог. м берега. В пересчете в весовые единицы это равно в среднем 124.7 т на 1 пог. м или для всех абразионных берегов за указанный период 10 700 тыс. т.

Для процесса абразии берегов водохранилища характерна тенденция к постепенному уменьшению его интенсивности по мере увеличения срока существования водоема. Это может быть проиллюстрировано следующими цифрами. За 12-летний период (1939—1951 гг.) среднегодовой объем обрушенного грунта на обследованных участках был равен 4 м^3 на 1 пог. м берега, в последующее десятилетие (1952—1961 гг.) он составил уже 2.6 м^3, в 1962 г. — 2.9, в 1963 г. — 1.6 м^3, а в 1964 г. абразии берега не наблюдались совсем. Пересчет указанных величин в весовые показывает, что поступление взвешенного вещества в чашу водохранилища за счет переформирования берегов до 1951 г. превышало суммарный сток взвешенных наносов в 2.3 раза, в последующее десятилетие они были примерно одинаковы, а в начале 60-х годов сток речных наносов превосходил поступление материала за счет береговой абразии.

Наблюдений за размывом мелководий на Угличском водохранилище не производилось. Исходя из морфологических и морфометрических особенностей водоема и размеров ветрового волнения, можно полагать, что масштабы этого явления здесь менее

значительны, чем в Иваньковском водохранилище, и роль основного поставщика автохтонных взвесей играет в этом водохранилище береговая абразия.

В Рыбинском водохранилище общая длина абразионных берегов, по обследованию 1961 г., составляет 152 км, или 9% длины береговой линии (Иванов, 1965). Места абразии берегов расположены в основном в речных плёсах водохранилища. Существенные различия волнового режима и геолого-морфологического строения абразионных берегов обусловили различную интенсивность их переформирования, начало которого относится к 1947 г., когда впервые был достигнут НПУ. Объем переформированного грунта на 1 пог. м берега к 1963 г. составил, по данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, 47—527 м^3. Коэффициент аккумуляции на разных участках колебался в пределах от 10 до 90%. Это означает, что часть переработанного материала откладывалась в пределах сравнительно узкой полосы береговой отмели (10—160 м), а остальной поступал в глубоководные участки водоема. Продукты размыва берега, слагающие береговую отмель, при определенном сочетании уровня и волнения подвергались взмучиванию и также частично поступали в глубоководную зону.

Если принять условно средний объем береговых переформирований на 1 пог. м абразионного берега равным средней из наблюденных величин (около 190 м^3 на пог. м), то общее поступление материала из этого источника равно $28.5 \cdot 10^6$ м^3 или около 46 000 тыс. т (при средней пористости 40% и удельном весе 2.7 т/м^3).

Волновое воздействие на дно водоема не ограничивается узкой полосой береговой отмели. При определенном соотношении высот волн и глубин водоема оно распространяется на всю прибрежную мелководную зону и районы подводных возвышенностей в глубоководной зоне. На Рыбинском водохранилище, где глубины 0—2 м занимают 21% площади дна, 0—6 м — 37%, а разгоны волны достигают нескольких десятков километров, размыв мелководий происходит в значительно больших размерах, чем в водохранилищах долинного типа. Можно полагать, что в первые годы существования водохранилища при бытовавших до 1947 г. низких навигационных уровнях и при несоответствии сортировки вновь залитых грунтов гидродинамической активности водоема процесс размыва шел наиболее интенсивно. Довольно быстрое очищение ложа водохранилища от затопленного леса, которого к 1949 г. сохранилось 40%, а к 1960 г. только 9% от всей площади, ранее занятой древесной растительностью (Тачалов, 1965), и повторение после 1947 г. лет с низкими навигационными уровнями (частота минимальных навигационных уровней на 2 м ниже НПУ равна 33%) способствовали дальнейшему развитию процесса размыва мелководий.

В результате этого процесса происходило повышение отметок дна на аккумулятивных участках ложа и понижение отметок дна

размываемых мелководий с образованием здесь плаца из более крупных частиц, размеры которых находятся в равновесии с гидродинамической активностью водной массы на данном участке. Обследования нескольких мелководных участков в Волжском и

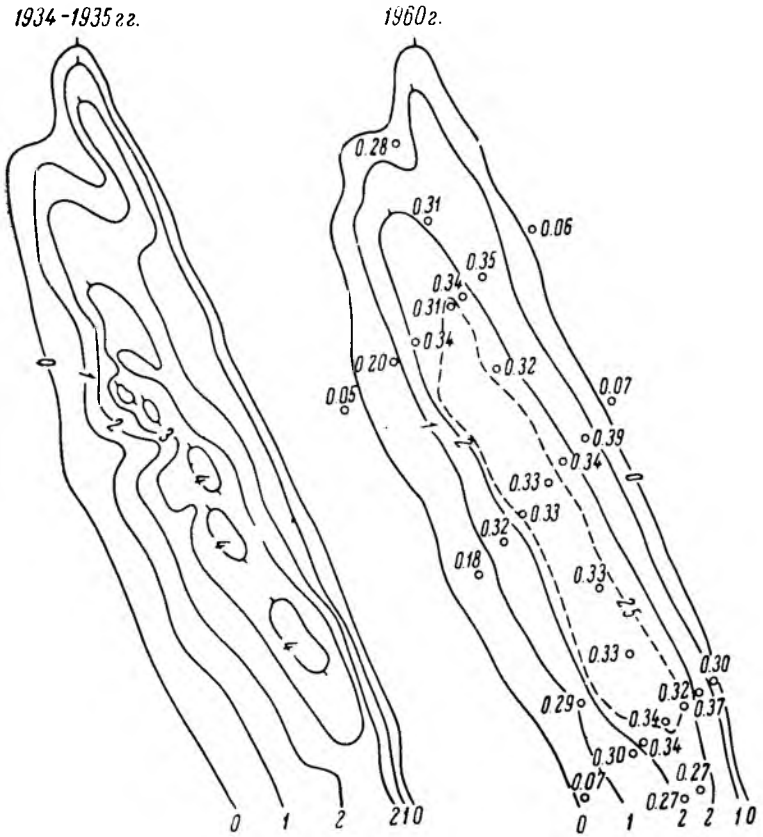


Рис. 24. План мелководья Лысая Гора в Волжском плёсе Рыбинского водохранилища по съемкам 1934—1935 и 1960 гг.

Цифры — величины медианных диаметров частиц грунта, мм.

Главном плёсах водохранилища, включающие съемки и повторные нивелировки постоянно закрепленных профилей (Зиминова, Курдин 1968б), позволили установить, что при размыве участков произошло нивелирование их поверхности. Бугристый до затопления рельеф ее сменился плоским, горизонтали приняли более плавную конфигурацию (рис. 24, 25), абсолютные высоты уменьшились на 1.5 м.

В результате переотложения наносов, высвобождающихся при переформировании грунтов, произошла не только их аккумуляция

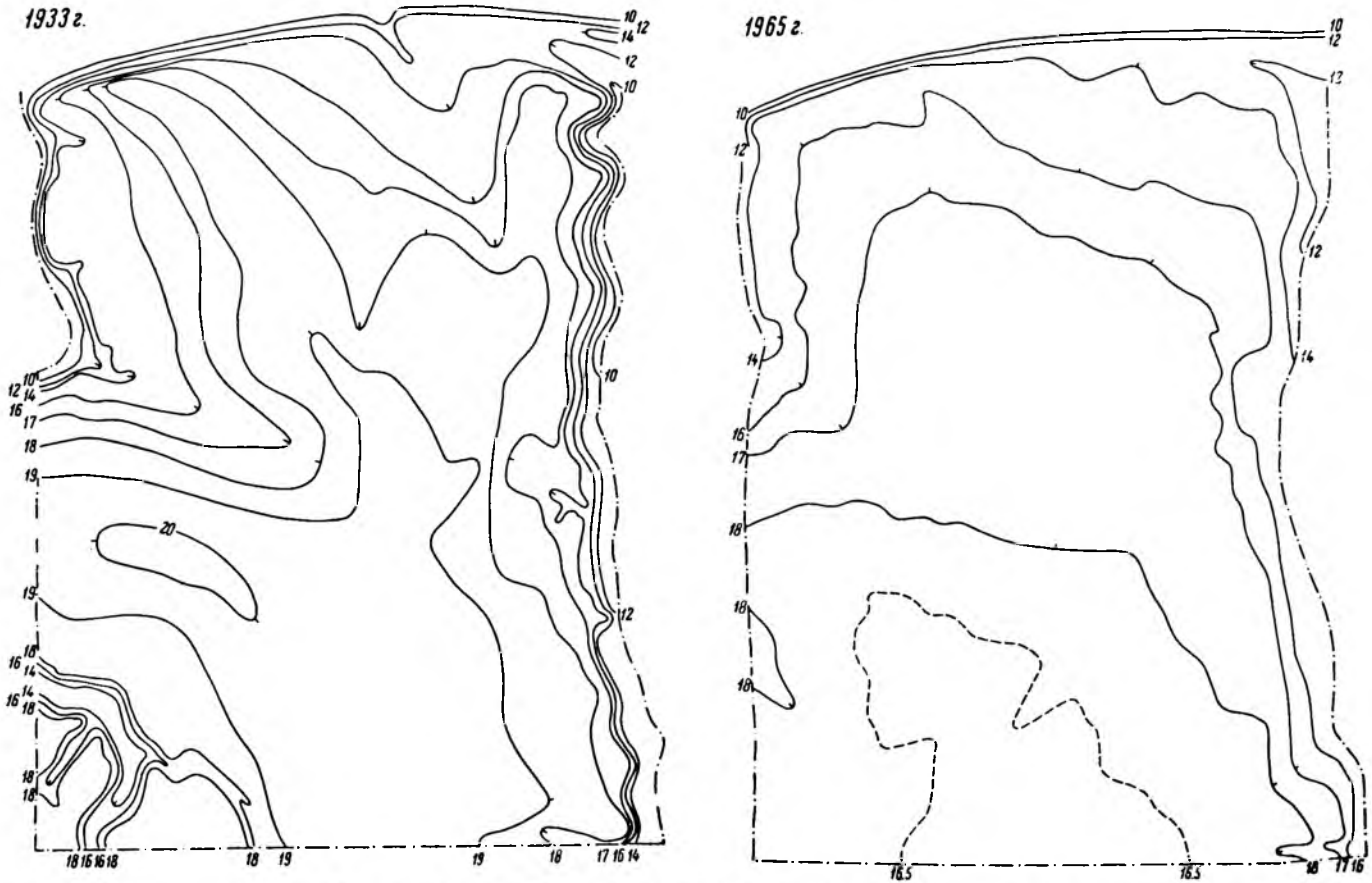


Рис. 25. План мелководья Горькая Соль в Главном плёсе Рыбинского водохранилища по съемкам 1933 и 1965 гг.

на склонах с образованием защитного слоя (плаща наносов) по всей поверхности мелководий, но и вынос значительной части грунта за их пределы. Один из обследованных участков (банка Лысая Гора в Волжском плёсе) с момента заполнения водохранилища (весна 1941 г.) потерял 14.7 тыс. м³ грунта, или 13.7% своего первоначального объема. Объем грунта, вынесенный за пределы участка Горькая Соль (Главный плёс), составил 397 тыс. м³,

Таблица 13

Объемы грунта, общий элементарный размыв и общая элементарная аккумуляция на участке мелководья Горькая Соль

Горизонталь, м усл.	Размыв, м³	Аккумуляция, м³	Размыв (—) и аккумуляция (+), м
20.0	2090	—	—0.133
19.0	154060	—	—0.534
18.0	177530	—	—0.564
17.0	130220	—	—0.614
16.0	25290	—	—0.561
15.0	—	6940	+0.078
14.0	—	23340	+0.237
13.0	—	27350	+0.346
12.0	—	18600	+0.385
11.0	—	10820	+0.400
10.0	—	4750	+0.400
Всего	489190	91800	—

или 5% его первоначального объема, что соответствует 81% общего объема размыва.

Данные расчетов объема размытого и аккумулированного грунта позволили вычислить для обследованных участков величины элементарного размыва и аккумуляции, которые могут быть полезны при расчетах заиления водохранилища материалом, поступающим от размыва мелководий (табл. 13). Под элементарным размывом или элементарной аккумуляцией понимается отношение объема размыва или объема аккумуляции к площади соответствующей горизонтали. Размерность, как следует из определения, может быть выражена в сантиметрах или метрах. Следовательно, элементарный размыв дает представление о слое смытого грунта, а элементарная аккумуляция — о слое отложившегося грунта. Величина элементарного размыва на исследованных участках составляла 0.4—0.6 м на уровне критической горизонтали, т. е. той, на которой размыв сменяется аккумуляцией.

Существенные различия в механическом составе первичных грунтов мелководий, а также в гидродинамической активности водной массы на разных участках не позволили распространять

полученные величины элементарного размыва на весь водоем и рассчитать количество материала, поступившего в него за счет размыва мелководий. Однако полученные величины элементарного размыва в сочетании с почти повсеместным размывом мелководий в Главном плёсе свидетельствуют о том, что этот источник взвешенного вещества нельзя не учитывать при анализе факторов формирования донных отложений. Результаты исследования мелководий позволяют сделать вывод о завершении к началу 60-х годов их интенсивного переформирования. Доказательством этого являются совпадение расчетных отметок устойчивого профиля дна с наблюдаемыми в настоящее время, высокая степень сортировки частиц грунта, появление плаща наносов на поверхности мелководий и постоянство отметок при повторных нивелировках.

Завершение интенсивного переформирования первичных грунтов, как показала съемка 1965 г., произошло по всему диапазону глубин 0—6 м (Курдин, Зиминова, 1971б). На этих глубинах достигнуто динамическое равновесие между гидродинамической активностью водной массы и механическим составом грунта, и в будущем нельзя ожидать значительного поступления взвесей в глубоководные участки за счет размыва мелководий.

Помимо донной и береговой абразии на Рыбинском водохранилище существует специфический объект абразии — торфяные сплавины. Водохранилищем было затоплено около 800 км^2 торфяных болот. Часть торфяных массивов со временем всплыла на поверхность воды, образовав торфяные острова — сплавины, подверженные действию волнения и являющиеся источником мелкой торфяной взвеси. Последовательность всплывания торфяных сплавин на водохранилище описана С. Н Тачаловым (1965). По его данным, в первые годы существования водохранилища происходило всплывание небольших островов, вызываемое поднимающимся при весеннем наполнении льдом, смерзшимся с торфом. Часть торфов при оттаивании тонула и суммарная площадь сохранившихся на поверхности сплавин на протяжении первых 5 лет изменялась мало. После наполнения водохранилища до проектной отметки (1947 г.) всплывание торфов активизировалось и достигло максимума в 1958—1960 гг.

Параллельно с процессом всплывания шел процесс разрушения сплавин под воздействием ветрового волнения. Интенсивность этого процесса со временем нарастала по мере самоочищения водохранилища от затопленных лесов и увеличения вследствие этого размеров ветрового волнения. К началу 60-х годов часть доступных волнению сплавин была полностью разрушена, площадь других значительно уменьшилась. К 1965 г. разрушению подверглось около 40% площади всех сплавин, всплывших на водохранилище за период 1941—1965 гг. Общий объем разрушенных сплавин составил, по ориентировочным расчетам, $66 \cdot 10^6$ м^3. Абсолютно сухой объемный вес торфа в Рыбинском водохранилище, по нашим

определениям, равен 0.08 г/см³. Исходя из этого, общий абсолютно сухой вес взвешенных веществ, поступивших к 1965 г. в водохранилище за счет размыва торфяных сплавин, составил 5280 тыс. т.

По данным С. Н. Тачалова, начиная с 1961 г. всплывание торфов пошло на убыль и с каждым годом оно уменьшается. Поскольку всплывшие и доступные волнению сплавины в значительной степени разрушены, поступление в донные отложения материала из этого источника неуклонно сокращается.

Продуцирование фитопланктона и высшей водной растительности

Среди биотических факторов, вызывающих обогащение воды взвешенным веществом, на первом месте стоит продуцирование фитопланктона.

Наиболее продуктивным из водохранилищ каскада является Иваньковское. Количество сухого органического вещества, синтезируемое фитопланктоном за год, составляет в нем 759 г/м² или 150 тыс. т в пересчете на площадь водоема (Пырина, 1966). По исследованиям Б. А. Скопинцева (1947) и С. И. Кузнецова (1955), около 85% продукции фитопланктона относится к нестойкому органическому веществу, минерализующемуся в течение нескольких дней. Исходя из этого, можно считать, что от общей продукции фитопланктона остается во взвешенном состоянии и принимает участие в процессах транспорта и седиментации взвесей около 15%. Это допущение, конечно, условно, так как процессы транспорта и седиментации происходят на всех этапах минерализации автохтонных органических взвесей. Часть биотических взвесей, сбрасываемая из водохранилища со стоком до достижения принятой степени минерализации, не учитывается при оценке поступления взвесей из этого источника. Однако, принимая во внимание высокие темпы минерализации в условиях летних температур воды, можно полагать, что эта погрешность не может быть значительной. В случае седиментации маломинерализованных органических взвесей процесс их распада продолжается на дне, при этом фиксируемые донные отложения включают в себя продукты этого распада.

Расчет показывает, что в Иваньковском водохранилище количество взвешенного вещества за счет продуцирования фитопланктона с учетом его минерализации составляет 22.5 тыс. т в год или 720 тыс. т за расчетный период.

Годовая продукция высшей водной растительности в водохранилище составляет 27 тыс. т сухого веса (Экзерцев, 1958). Так как около 50% биомассы высшей водной растительности минерализуется (Корелякова, 1958), поступление взвешенного вещества за счет вегетации высшей водной растительности составляет около 13.5 тыс. т в год или 432 тыс. т за весь период существования

водохранилища. Суммарное же поступление вещества из этих источников определяется, таким образом, в 1152 тыс. т.

Сведения о величине продукции фитопланктона Угличского водохранилища ограничиваются единичными измерениями Ю. И. Сорокина (1961), которые не могут быть использованы для

Заросли высшей водной растительности в заливах Иваньковского водохранилища, служащие материалом для образования отложений из макрофитов.

расчетов годовой величины продукции. Анализ сезонной динамики численности и биомассы фитопланктона показывает, что он формируется в основном из фитопланктона Иваньковского водохранилища, сохраняя тот же видовой состав и количественные соотношения отдельных групп. Средние за вегетационный период биомассы фитопланктона Угличского и Иваньковского водохранилищ также близки (Буторина, 1961, 1966). Исходя из этого, представляется возможным рассчитать в первом приближении первичную продукцию Угличского водохранилища по результатам наблюдений над продуцированием органического вещества

в Иваньковском водохранилище. Рассчитанная таким образом годовая продукция равна 114 тыс. т сухого органического вещества. Вычитая легкоминерализующиеся органические вещества, получим 17 тыс. т в год или 493 тыс. т за весь рассматриваемый период.

Годовая продукция прибрежно-водной растительности, по определению В. В. Экзерцевой (1961), составляет 4.2 тыс. т абсолютно сухого веса. С учетом минерализации части биомассы высшей водной растительности общая величина поступления взвешенного вещества из этого источника за расчетный период равна 61 тыс. т. Таким образом, поступление взвешенного вещества за счет вегетации фитопланктона и прибрежно-водной растительности в Угличском водохранилище составило в сумме 554 тыс. т в сухом весе.

Продукция фитопланктона в Рыбинском водохранилище, определенная для отдельных лет различными авторами, выражается следующими величинами (табл. 14).

Таблица 14

Продукция фитопланктона в Рыбинском водохранилище за вегетационный период

Год	Под 1 м² сухого органического вещества		Литературный источник
	чистая	валовая	
1955	100	154	Сорокин, 1958б
1958	—	198	Пырина, 1966
1959	216	332	Романенко, 1966
1961	64	98	Кузнецов, Карпова, 1966
1964	58	89	Кузнецов и др., 1966
1965	36	55	Кузнецов и др., 1967
1966	148	228	Кузнецов и др., 1971а
1967	132	204	Кузнецов и др., 1971б
Среднее . .	—	170	

Все авторы, кроме И. Л. Пыриной (1966), определяли первичную продукцию радиоуглеродным методом. В. И. Романенко (1967) на массовом материале установил, что радиоуглеродный метод дает величину, близкую к чистой продукции и в 1.54 раза меньше валовой. Поэтому при расчете средней многолетней продукции значения, полученные радиоуглеродным методом, были умножены на 1.54. Колебания первичной продукции от года к году довольно значительны (табл. 14) и обусловлены гидрометеорологическими особенностями отдельных лет (характер и сроки наполнения водохранилища, состав приносимых вод и насыщенность их планктоном, ход температуры воды). Средняя

продукция за вегетационный период, по данным за 8 лет, равна 170 г сухого органического вещества под 1 м². Расчеты, аналогичные сделанным для Иваньковского и Угличского водохранилищ, показывают, что количество взвешенного органического вещества за счет продуцирования фитопланктона в Рыбинском водохранилище составляет около 100 тыс. т в год или 2500 тыс. т за период 1941—1965 гг. Продукция высшей водной растительности, по данным А. П. Белавской и Т. Н. Кутовой (1966), равна 32 тыс. т, что с учетом минерализации дает около 400 тыс. т за расчетный

Таблица 15

Количество взвешенного вещества, поступившего в верхневолжские водохранилища из различных источников

Водохранилище	Сток наносов, тыс. т	Размыв берегов и дна, тыс. т	Продукция фитопланктона и высшей водной растительности, тыс. т
1937—1968			
Иваньковское	6250	14440	1150
1940—1968			
Угличское	7160	10700	550
1941—1965			
Рыбинское	19000	86600	2900

период. Таким образом, общее поступление взвешенного вещества в водную массу водохранилища за счет развития фитопланктона и высшей водной растительности за 25 лет составило 2900 тыс. т.

Продукция бактерио- и зоопланктона при количественной оценке биотических источников взвешенного вещества в водохранилищах не учитывалась, хотя продукция бактерий в водохранилище вполне соизмерима с продукцией фитопланктона (Романенко, 1966; Кузнецов и др., 1967). Принимая во внимание судьбу большей части бактериальной биомассы (лизис, выедание зоопланктоном, деструкция), можно с некоторым допущением считать, что ее приход равен расходу.

Нами была предпринята попытка оценить порядок величины продукции зоопланктона в Рыбинском водохранилище, пользуясь уравнением Г. Г. Винберга и др. (1965). При расчетах были приняты средние за вегетационный период величины биомассы руководящих форм, приведенные Л. А. Луферовой и А. В. Монаковым (1966), П/Б коэффициенты (отношение продукции к биомассе) для соответствующих форм в мезотрофном озере по Г. Г. Винбергу и др. (1965), рационы хищников по Э. А. Шушкиной и

Г. А. Печень (1964). Расчет дал величину продукции зоопланктона 8 г/м^3 сырого веса или 16 тыс. т сухого веса во всем объеме водохранилища (Зиминова, Курдин, 1972а). Правильность наших оценок подтвердилась результатами детальных расчетов продукции зоопланктона, проведенных позднее Т. М. Владимировой (1974). Учитывая, что около 30% веса зоопланктона составляет органическое вещество, состоящее в основном (70—90%) из веществ, легко распадающихся до растворимых в воде продуктов (Казаков, Пронина, 1941), можно считать, что роль зоопланктона как источника грунтообразующего материала ничтожна. Это, по-видимому, справедливо и для двух других водохранилищ, поскольку соотношение средней за вегетационный период биомассы фито- и зоопланктона в них такое же, что и в Рыбинском.

Таким образом, во всех верхневолжских водохранилищах основная масса взвешенного вещества образуется в основном за счет абразионной деятельности водной массы водоема (табл. 15), а также за счет стока речных наносов и биотических источников взвесей. По абсолютной величине массы взвешенного вещества, поступающего в водохранилище, первое место занимает Рыбинское, обладающее наибольшими размерами чаши и площади водосбора. Удельный (на единицу поверхности дна) приход взвешенного вещества в этом водоеме вдвое меньше (около 1 тыс. т на 1 км^2 в год), чем в Иваньковском и Угличском водохранилищах.

ГЛАВА IV

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Началом формирования грунтового комплекса водохранилища следует считать это заполнение, а исходным материалом — почвенный покров территории, занятой водоемом. Под воздействием физических и биохимических процессов из первичных грунтов и поступающих в водоем и образующихся в нем грунтообразующих материалов (затопленные почвы и растительность, аллювиальные наносы, продукты размыва берегов и ложа водоема, продукты жизнедеятельности и остатки животных и растительных организмов, населяющих водную толщу) образуются донные отложения водохранилищ. Схематично процесс формирования донных отложений в водохранилищах представлен на рис. 26.

Формирование донных отложений и их свойства определяются в каждом водоеме характером грунтообразующего материала и гидродинамической активностью водных масс, зависящей от типа водоема, его морфометрии и режима эксплуатации. В русловых и

долинных водохранилищах преобладающая форма гидродинамической активности — стоковые течения. Течения переносят взвешенный материал, размывают подстилающий грунт при достаточно больших скоростях и сортируют частицы по крупности. Скорости стоковых течений в русловых и долинных водохранилищах

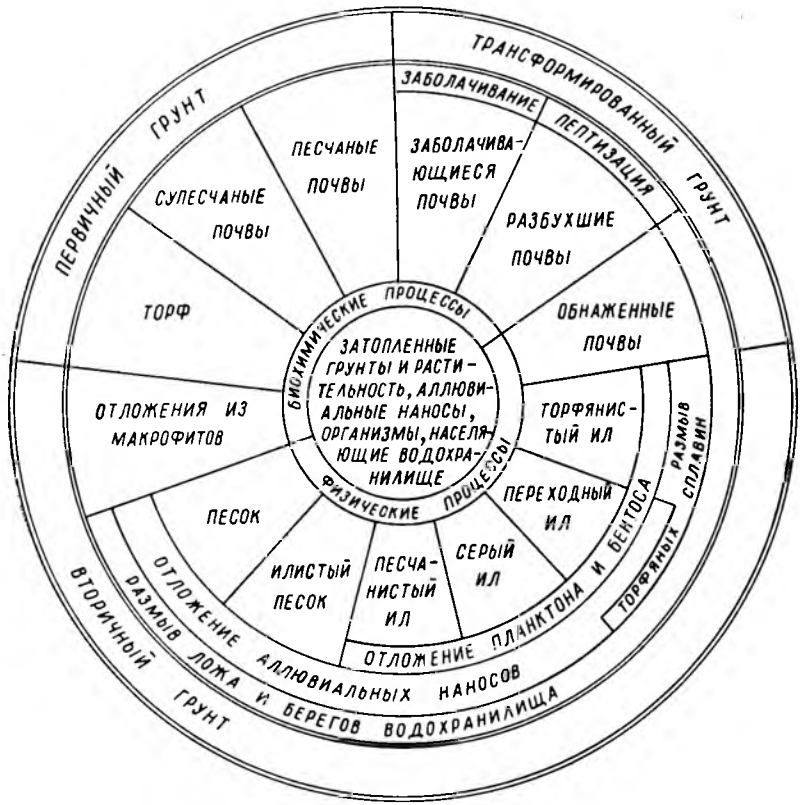


Рис. 26. Схема формирования грунтов водохранилищ.

уменьшаются в направлении к плотине, поэтому в приплотинной части их образуются вторичные отложения наиболее тонкого механического состава, а дисперсность отложений возрастает по мере уменьшения скоростей течения. В водохранилищах озерного типа основная форма гидродинамической активности — волнение. При волнении наличие знакопеременных перемещений водной массы вдоль поверхности дна вызывает турбулизацию придонного слоя и размыв грунта на участках с глубинами, меньшими глубины размывающего действия волнения. При совместном действии волнения и ветрового течения интенсивность процесса взмучива-

ния возрастает. Удаляя частицы определенного размера (в зависимости от размеров волнения) за пределы размываемого участка, волнение тем самым определяет характер вторичных грунтов этого участка и поставляет грунтообразующий материал, переносимый течениями, в другие районы водохранилища. Размыв мелководных участков под воздействием волнения приводит к формированию песчанистых отложений, а смыв вновь отлагающихся взвесей с поверхности первичных грунтов — к сохранению на значительных площадях незаиленных почв. Наиболее мелкие и легкие частицы удаляются из зоны воздействия волнения и откладываются на участках, где влияние волнения ослаблено глубиной, формируя илистые отложения. С увеличением глубины в зоне формирования илистых отложений возрастает их мощность и увеличивается дисперсность частиц.

В местах сопряжения долинных и озерных участков водохранилищ на образование грунтового комплекса наряду с волнением и ветровыми течениями существенное влияние оказывают стоковые течения. Здесь происходит смешение аллохтонного и автохтонного грунтообразующего материала и образуются илы переходного типа.

На хорошо защищенных от волнения участках водохранилищ образуются донные отложения из макрофитов. Наконец, в грунтовый комплекс водохранилищ входят разбухшие и обнаженные почвы. Для образования разбухших почв наряду со слабой гидродинамической активностью, необходимо периодическое освобождение ложа от воды. Эти почвы наиболее характерны для зоны временного затопления. Обнаженные почвы образуются в результате абразии верхнего слоя под воздействием волнений и течений при удалении наносов за пределы участка.

Формирование грунтового комплекса водохранилищ представляет собой сложный процесс. Образование всех типов отложений протекает одновременно и взаимосвязанно. В том случае, если различные грунтообразующие материалы вступают в контакт примерно в одинаковых соотношениях, складываются отложения переходного типа. Примером может служить переходный ил, в накапливании которого принимают участие торфянистые частицы (или остатки макрофитов) и минеральные частицы, приносимые с речным стоком или образованные при размыве ложа водоема. К переходным типам отложений относятся также песчанистые илы и илистые пески.

Микрорельеф ложа может служить причиной локального формирования донных отложений различного характера. Это свойственно илистым отложениям, которые при соответствующих условиях образуют локальные скопления на площадях, занятых песчанистыми грунтами, несмотря на то что гидродинамическая активность водной массы определяет границу залегания ила на значительно больших глубинах. Происхождение таких обычно вытянутых пятен ила, приуроченных к месту резкого изменения

глубин, определяется преобладающим направлением распространения ветровых волн от более мелководной части района в глубоководную. При резком перепаде глубин волны, идущие с мелководного участка, на некотором отрезке своего пути сохраняют высоту, несмотря на возрастание глубины, способствующей их росту. Таким образом, ниже верхней бровки уступа дна образуется зона, в которой возможна аккумуляция более мелких частиц грунта, по сравнению с участками дна, расположенными выше бровки уступа и ниже его подошвы.

Вкрапления илистых отложений накапливаются иногда при преобладании отложений из макрофитов на заостровных участках. На участках водохранилищ, непосредственно примыкающих к размываемым торфяным сплавинам, образуются временные скопления торфянистого и переходных илов, которые при прекращении размыва сплавин исчезают вследствие трансседиментации слагающих их частиц.

Изложенное свидетельствует, что формирование грунтового комплекса в водохранилищах происходит одновременно под влиянием физических и биохимических процессов. Роль тех и других в образовании различного типа донных отложений неодинакова. Отложения, характеризующиеся сортировкой слагающих их частиц (песок, илистый песок, песчанистый ил, серый ил, переходный и торфянистый илы), сформировались под преобладающим воздействием физических процессов. В трасформации первичных грунтов (почвы, торф) решающая роль принадлежит биохимическим процессам.

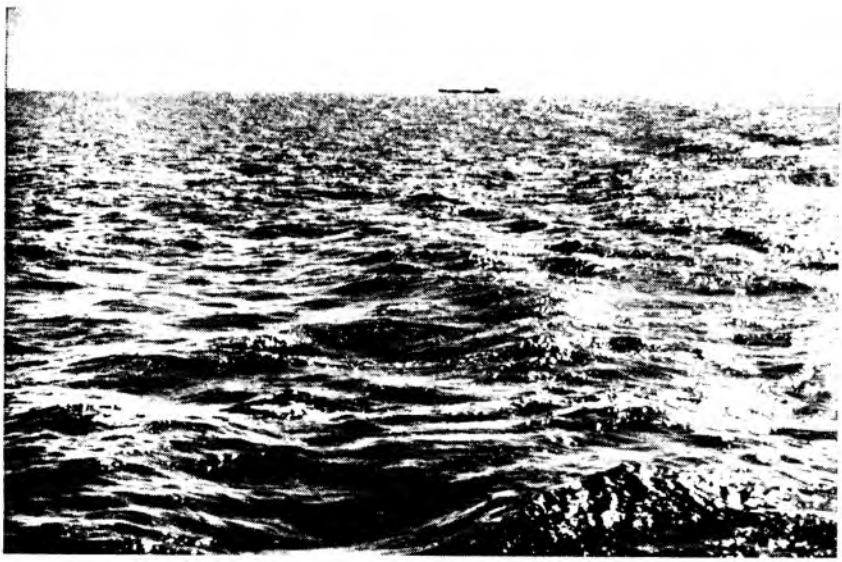
В результате указанных процессов в водохранилищах наряду с еще сохранившимися на некоторой части ложа первичными грунтами образовались новые, вторичные, отложения. Одновременно с первичными грунтами и вторичными отложениями в водохранилищах встречаются также отложения, которые в силу условий, создавшихся после затопления территории, изменились настолько, что считать их первичными грунтами нельзя. Такие отложения представляют собой самостоятельный тип грунтов — трансформированные грунты.

Таким образом, грунты водохранилищ по своему происхождению разделяются на три основные группы — первичные, трансформированные и вторичные. Остановимся на образовании каждого из них более подробно.

Первичные грунты. К первичным грунтам относится комплекс почв, затопленных при заполнении водохранилищ, которые в силу создавшихся гидродинамических условий на месте их залегания сохранились без существенных изменений своих первоначальных свойств. Первичные грунты встречаются на тех участках водохранилищ, где гидродинамическая активность мала для размыва дна, но достаточна для удаления с его поверхности вновь отлагающихся взвесей. Такие условия наблюдаются на защищенных от сильного волнения заостровных участках водоемов,

в заливах, а также на открытых участках, где глубины лимитируют развитие волнения.

Трансформированные грунты. К трансформированным грунтам относятся заболачивающиеся, разбухшие и обнаженные почвы. Они, как и первичные грунты, представляют собой комплекс почв, сохранившихся в водохранилищах, но в результате преимущественно биохимических процессов, протекающих



Главный плёс Рыбинского водохранилища.

в них, в условиях периодического подтопления, а иногда и смыва поверхностного слоя в значительной степени утратившие свойства, присущие им до затопления.

Заболачивающиеся почвы встречаются на хорошо защищенных от волнения участках мелководий. Мелководья в силу своеобразного уровенного режима водохранилищ подвергаются периодическим затоплениям, продолжительность которых различна и зависит от водности года и абсолютной высоты данного участка. Например, по Рыбинскому водохранилищу (1947—1958 гг.) средняя продолжительность затопления для участков, расположенных выше НПУ, — 51 день, для участков дна с глубиной до 0.5 м — 86 дней, а с глубиной до 1.0 м — 141 день. В результате временных затоплений происходит заболачивание, сходное с тем, которое наблюдается в пониженных участках поймы (Шраг, 1953). На мелководных участках, где почвы заболочены до создания водохранилища, процесс заболачивания усиливается. Наиболее быстро с оторфовыванием перегнойного слоя заболачиваются тяжелосуг-

ленистые и глинистые почвы, при этом происходит накопление закисного железа с образованием глеевого горизонта. В качестве примера можно привести мелководья Шошинского плёса Иваньковского водохранилища и расширенной части Волжского плёса Рыбинского водохранилища, где оглеенный слой достигает 6—8 см.

Разбухшие почвы образуются в результате пептизации, которой подвергается в основном перегнойный горизонт, богатый гумусовыми веществами (сильно заторфованные, торфянистые и черноземные почвы). Сильнее разбухают почвы тяжелого механического состава. При этом плотность их уменьшается, они становятся легкодоступными бентосным организмам, живущим в толще грунта. Однако в очень сильно разбухших почвах, как и в илах с большой максимальной молекулярной влагоемкостью, создаются анаэробные условия (Сорокин, 1958а). Разбухшие почвы встречаются как на временно затопленных и хорошо защищенных от волнения участках, так и на постоянно залитых площадях с глубинами, где гидродинамическая активность мала для размыва, но достаточна для удаления с поверхности грунта отлагающихся взвесей.

Обнаженные почвы образовались в результате абразии верхнего слоя. В них отсутствует гумусовый горизонт, а продукты его размыва удалены с поверхности открывшегося элювиального горизонта. В условиях большей гидродинамической активности обнаженным слоем может быть иллювиальный горизонт. Механический состав обнаженных почв определяется механическим составом материнской породы. Расположены эти грунты на доступных для волнения мелководьях осушной зоны, местами обнажения имеют очаговый характер.

Вторичные грунты. Вторичные грунты образовались в водохранилищах за время их существования в результате поступления грунтообразующего материала из различных источников. К этим грунтам относятся пески, илистые пески, песчанистые илы и илы, т. е. те отложения, образованию которых в водохранилище предшествует предварительная сортировка по крупности слагающих их частиц. Исключение составляют отложения из макрофитов, которые в отличие от перечисленных грунтов образуются в результате разложения растительной массы без сортировки частиц.

Пески залегают на участках водоема с высокой гидродинамической активностью. По образованию их можно подразделить на русловые, прибрежные и пески открытых пространств. Русловые пески сохранились в верховьях плёсов или их сужениях на бывших руслах рек. Здесь стоковые течения в половодье или во время пропусков через ГЭС смывают наносы, отлагающиеся в период ослабления проточности участка. Когда величины скоростей течения меньше бытовых, происходит погребение аллювиальных русловых песков более мелкими, поступающими с речным стоком.

Пески прибрежья сформировались при размыве берега волне-

нием. При волновой абразии берега происходит сортировка частиц по крупности. Мелкие частицы удаляются за пределы береговой отмели, крупные песчанистые — формируют отмель. Размер преобладающей фракции в песках зависит от силы волнения и гранулометрического состава материнской породы.

Пески открытых пространств образовались на глубинах, где дно подвержено действию волнения. При этом мелкие частицы вымываются и уносятся, а на поверхности грунта отлагаются частицы с большой гидравлической крупностью. Таким образом, на поверхности первичного грунта образуется защитный слой песка, препятствующий дальнейшему размыву.

Илистый песок образуется на границе распространения песков и на других обособленных участках, где наблюдается частая и сильная пульсация гидродинамической активности. Кратковременное усиление активности не может полностью удалить илистые частицы, отложившиеся за время ее ослабления.

Песчанистые и серые илы по происхождению делятся на аллювиальные и местные. Первые образуются из вносимых в водохранилище аллювиальных наносов. Местом накопления этих илов служат зоны выклинивания подпора в верховьях речных плёсов или участки плёсов, где наблюдается ослабление проточности. При длительных ослаблениях проточности аллювиальный ил отлагается слоем, который не размывается полностью при увеличении скорости течения. Местные илы формируются в основном из продуктов размыва берега и ложа водохранилища. В отличие от аллювиальных в месте их образования гидродинамическая активность всегда мала, и чем она меньше, тем больше преобладание мелких частиц, слагающих отложения.

Торфянистый ил образуется в основном из продуктов размыва торфяных залежей и торфяных сплавин. Торфянистые частицы обладают малой гидравлической крупностью при относительно больших размерах, поэтому они легко подвергаются трансседиментации, и местом их постоянного нахождения могут служить только участки со слабой гидродинамической активностью. Временные скопления торфянистого ила могут быть и при значительной гидродинамической активности у мест нахождения торфяных сплавин, поскольку здесь образование торфяной крошки преобладает над ее трансседиментацией за пределы участка.

Переходный ил — связующее звено между серым и торфянистым илом, частицы которых одновременно участвуют в его образовании.

В формировании всех илов принимают участие остатки затопленной наземной растительности, продукты ветрового переноса, остатки водной фауны и флоры. Грунтообразующий материал, поступающий из этих источников, рассеивается по всему водоему и не образует специфических отложений, за исключением отложений из прибрежно-водной растительности. Эти отложения встречаются в изолированных от волнения заливах и заостровных прс-

странствах. При большой изрезанности береговой линии и малых глубинах прибрежные отложения из макрофитов могут занимать значительные участки, например в Иваньковском водохранилище.

Выделение трех специфических типов грунтов в водохранилищах и анализ особенностей их образования позволяют подойти к вопросу классификации донных отложений в этих водоемах. За основу такой классификации наиболее целесообразно взять происхождение грунтов, так как именно оно определяет их основные физические и химические свойства и закономерности распределения. В связи с этим классификация грунтов водохранилищ построена по следующей схеме.

1. Все грунты водохранилища подразделяются на три основные группы: первичные — сохранившиеся после затопления почвы и торф; трансформированные — сохранившиеся после затопления почвы с существенным изменением их свойств; вторичные — образовавшиеся в водохранилище в результате процессов формирования водоема.

2. Первичные и вторичные грунты по содержанию общего органического вещества делятся на две подгруппы — органические и неорганические. Первые содержат более 30% органического вещества (по потере в весе при прокаливании), вторые — меньше 30%. Это деление основывается на намечающемся при переходе через указанную границу изменении в окраске грунта (отложения приобретают заметный коричневый оттенок) и на резком возрастании содержания лигнино-гумусового комплекса.

3. Разделение подгрупп на отдельные типы грунтов производится по их частным характеристикам: гранулометрическому составу, содержанию общего органического вещества, консистенции и цвету, причем для вторичных отложений основной характеристикой является содержание суммы илистых и глинистых частиц (<0.01 мм), зависящее от гидродинамической активности участка водохранилища. На основе данной схемы составлена классификация грунтов верхневолжских водохранилищ (табл. 16).

Анализ материалов по донным отложениям Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ показал большое сходство в составе грунтовых комплексов этих водоемов. Различен только удельный вес площадей, занимаемых однотипными отложениями, поскольку доля участия отдельных грунтообразующих материалов в формировании грунтового комплекса неодинакова. Различно также высотное положение границы между илистыми и другими грунтами, которое определяется гидродинамической активностью не только водохранилища в целом, но и отдельных его участков.

Учитывая, что основные источники грунтообразующего материала в верхневолжских водохранилищах характерны для всех равнинных водохранилищ средней полосы СССР, можно рекомендовать приведенную классификацию в качестве основы для состав-

Классификация грунтов водохранилищ

Группа	Подгруппа	Тип	Характеристики: потеря в весе при прокаливании, %	Характеристики: сумма фракций < 0.01 мм, %	Характеристики: Консистенция	Характеристики: Цвет	Гидродинамическая активность водохранилища в месте залегания грунта
Первичные	Неорганические	Песчаная почва	< 10	< 10	Очень плотный	Светло-желтый, желтый, светло-серый	Слабая
		Супесчаная почва	10—30	10—30			
	Органические	Торф	> 70	—	Плотный	Коричневый, темно-коричневый	»
Трансформированные	Неорганические	Обнаженные почвы	< 3	> 0	Очень плотный	Светло-серый, серый, светло-желтый, желтый, коричневый	Средняя и слабая
		Разбухшие почвы	> 30	> 30	Пластичный	Темно-серый, коричневый	Очень слабая
		Заболачивающиеся почвы	> 10	> 0	Плотный		
Вторичные	Неорганические	Песок	< 3	< 5	Плотный	Светло-желтый, желтый	Очень высокая
		Илистый песок	3—10	5—10		Светло-коричневый	Высокая
		Песчанистый серый ил	10—20	10—30	Пластичный	Светло-серый, серый	Средняя
		Серый ил	20—30	> 30	Полужидкий	Серый, темно-серый	Слабая
		Переходный ил	30—40	> 30	Полужидкий	Темно-серый с коричневым оттенком	»
	Органические	Торфянистый ил	40—70	> 30		Коричневый, темно-коричневый	»
		Отложения из макрофитов	> 40	—			Очень слабая

Примечание. Некоторые разбухшие и заболачивающиеся почвы могут относиться к подгруппе органических грунтов, например почвы с оторфовавшейся дерновиной.

лепия единой классификации грунтов равнинных водохранилищ умеренной зоны. Предлагаемая классификационная схема была успешно использована при исследованиях грунтового комплекса Горьковского и Можайского водохранилищ (Виноградова, 1969; Виноградова, Эдельштейн, 1971).

ГЛАВА V

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Распределение донных отложений в водохранилищах, как и их образование, определяется прежде всего гидродинамической активностью водных масс, той ее формой, которая преобладает на данном участке водоема. На русловых участках водохранилищ широко распространены песчаные отложения. Образование их связано с большими скоростями стоковых течений во время половодья или попусков ГЭС. Илистые частицы, отлагающиеся на этих участках в периоды минимальной проточности, при высоких скоростях течения смываются и выносятся в расширенные долинные участки водохранилищ.

Большие скорости при пропусках воды через гидросооружения в ряде случаев вызывают размыв первичных аллювиальных песков, что приводит к увеличению в них относительного содержания крупных частиц. Это явление характерно для участка Угличского водохранилища, примыкающего к плотине Иваньковской ГЭС, и руслового участка Волжского плёса Рыбинского водохранилища у плотины Угличской ГЭС.

На приплотинных участках водохранилищ и в различного рода озеровидных расширениях, где преобладающей формой гидродинамической активности является волнение, распределение грунтов определяется главным образом его особенностями и морфометрией водоема. Большая повторяемость волнения, обладающего размывающей способностью, приводит к увеличению площадей, занимаемых песками, и сокращению площадей илистых отложений. Нижние границы распространения песчанистых отложений в этом случае передвигаются на бо́льшие глубины.

Роль волновых процессов в распределении грунтов особенно четко проявляется в Рыбинском водохранилище. Здесь илистые отложения залегают на глубинах, до которых не распространяется размывающее действие волнения, т. е. бо́льших суммы глубины размывающего действия волнения и величины максимальной сработки водохранилища на навигационный период. Места с глубинами, меньшими критической глубины размыва, допускающими волновую эрозию дна, заняты песчанистыми отложениями. У на-

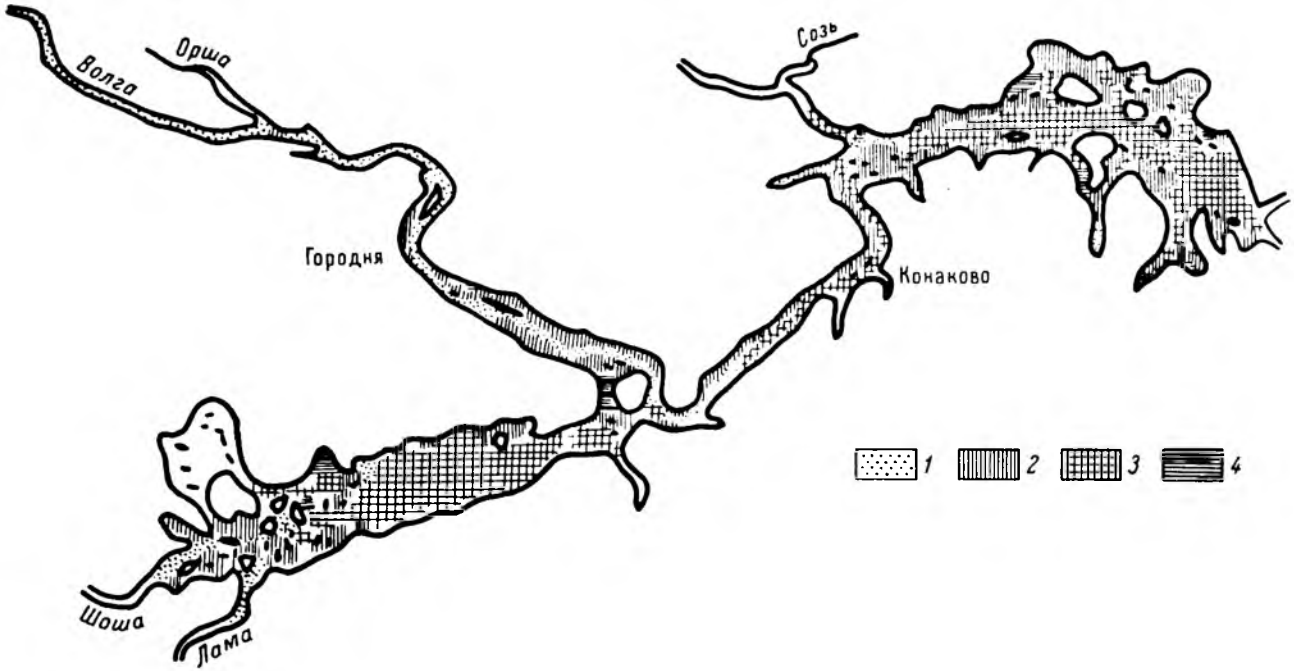


Рис. 27. Схема распределения донных отложений Иваньковского водохранилища.

1 — песок, илистый песок, *2* — почвы (разбухшие, обнаженные, заболоченные), *3* — песчанистый серый и серый ил, *4* — отложения из макрофитов.

ветренных берегов по направлению наибольших разгонов волн получили сильное развитие прибрежные пески. Между нижней границей песчанистых отложений и границей илов обычно залегают незаиленные почвы.

Следует отметить, что границы между отдельными грунтами в водохранилищах выражены в большинстве случаев нечетко. Между основными типами донных отложений залегают обычно переходные грунты. Величины площадей, занимаемые переходными отложениями, зависят от характера изменений гидродинамической активности на участке их залегания. При резком изменении ее эти площади невелики. Наоборот, при постепенном из-

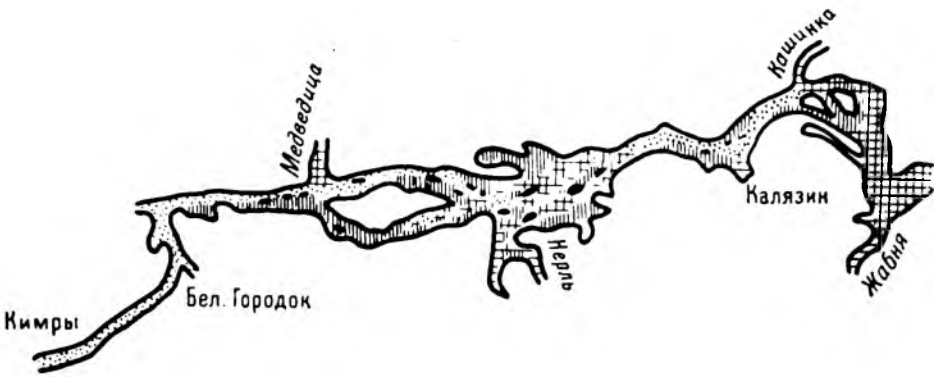


Рис. 28. Схема распределения донных от
1 — песок, *2* — почвы, *3* — серый песчани

менении гидродинамической активности переходные грунты могут занимать значительные участки. Это положение хорошо прослеживается на примере Иваньковского водохранилища (рис. 27).

Грунты Иваньковского водохранилища представлены четырьмя основными типами: песок и илистый песок, почвы (разбухшие, обнаженные, заболоченные), песчанистый серый и серый илы, отложения из макрофитов. Площади, занятые грунтами (рис. 27), распределяются следующим образом: почвы — 41%, пески и илистые пески — 10, песчанистые серые и серые илы — 45, отложения из макрофитов — 4% от общей площади дна водохранилища.

Верхний речной участок Волжского плёса водохранилища занят песком и илистым песком. По механическому составу грунтов на этом участке четко прослеживается переход от крупного песка в районе Калинина к илистому песку у бывшего устья Шоши. С уменьшением площади живого сечения ниже устья Шоши вновь появляются крупные и средние пески, которые примерно в 8 км выше г. Конакова сменяются серым песчанистым илом. Обширный участок дна занимает крупный песок у плёса р. Сози, так как за счет большой отмели по правому берегу площадь вод-

ного сечения здесь снова уменьшается и скорости течения в русловом участке водохранилища увеличиваются.

В Шошинском и Иваньковском плёсах преобладают песчанистый серый и серый илы, а также разбухшие, обнаженные и заболоченные почвы. Для этих плёсов характерны и отложения из макрофитов, которые контактируют обычно с обнаженными почвами (рис. 27).

Общая закономерность в распределении донных отложений Иваньковского водохранилища сводится к следующему. Прибрежные участки с неразмываемыми низкими берегами и малыми уклонами дна обычно заняты заболоченными, неразмываемыми или разбухшими и обнаженными почвами. В порядке возрастания глубин за ними следует песок, илистый песок и песчанистый серый ил. Такие участки характерны для западной части Шошинского и северного берега Иваньковского плёсов. При наличии размываемых берегов из указанного перечня грунтов выпадают почвы. Последние при незначительных уклонах дна и глубине меньше критической встречаются иногда в виде пятен на фоне илистых отложений. Такие участки имеются в Волжском, у южных берегов Иваньковского и Шошинского плёсов.

Переходными отложениями между почвами и песком и между почвами и серым илом являются песчанистый ил и илистый песок. Между торфянистым илом или отложениями из макрофитов и расположенными по соседству грунтами встречаются участки с переходным илом. Малые площади, занимаемые переходными отложениями, исключают возможность нанесения их на схему распределения грунтов (рис. 27).

Характер распределения грунтов Угличского водохранилища имеет общие черты с таковым в Иваньковском водохранилище. Верхний участок его до плёса р. Медведицы занят песчанистыми отложениями (рис. 28). На среднем участке водохранилища

(от плёса р. Нерль до устья р. Кашинки) преобладают незаиленные или слабо заиленные почвы с очагами серого ила. Только ниже впадения р. Кашинки как русловые, так и пойменные участки водохранилища покрыты серым илом, который является преобладающим типом донных отложений на всей площади приплотинного участка.

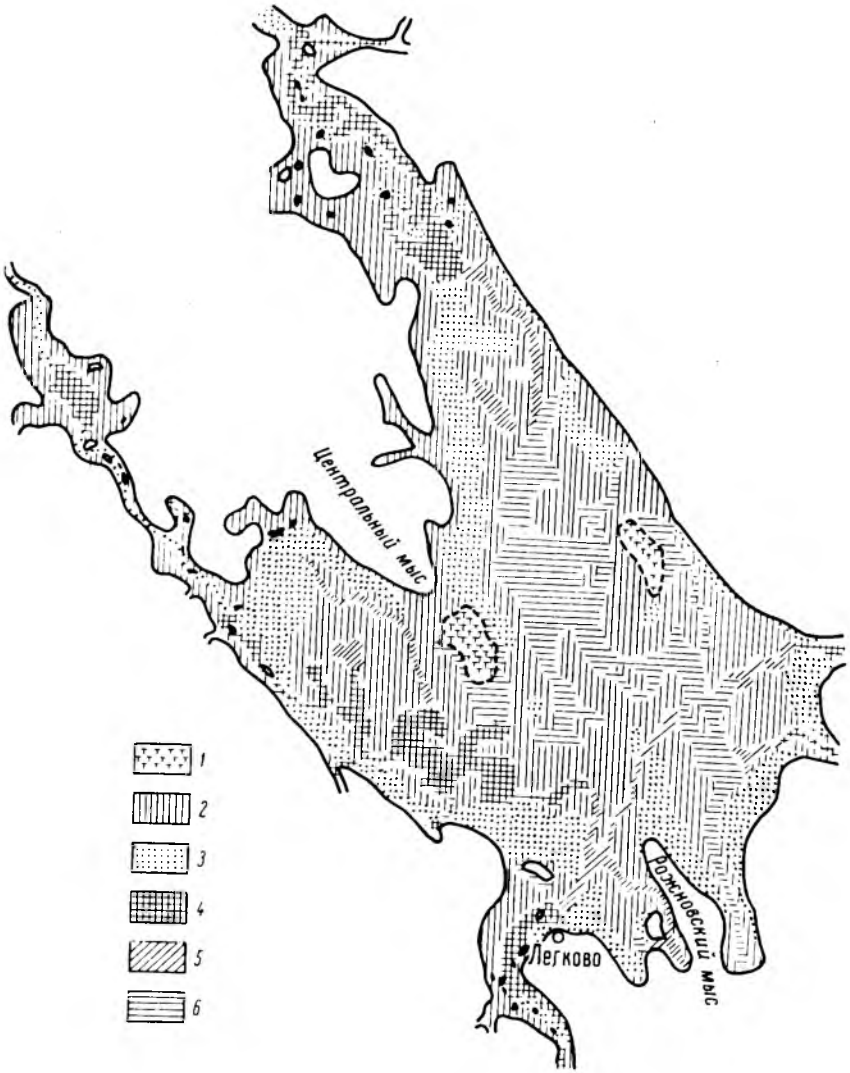
Распределение площадей, занятых основными типами донных отложений, в Угличском водохранилище характеризуется следующими величинами: различного рода почвы занимают 19%, песчанистые грунты — 17, серый песчанистый ил и серый ил — 64%. Отложения из макрофитов, торфянистый и переходный илы, а также трансформированные грунты занимают в сумме менее 1% площади дна водохранилища. Переходные грунты в этом водоеме наиболее хорошо выражены на участке между плёсами рек Медведицы и Кашинки. Они представлены илистыми песками и песчанистым серым илом.

В связи с различиями морфометрии и гидрологического режима Рыбинского водохранилища распределение донных отложений в нем имеет свои особенности в речных и Главном плёсах (Курдин, 1959). В основных речных плёсах — Волжском, Моложском и Шекснинском, а также в плёсах, образовавшихся при впадении в водохранилище более мелких рек, значительные площади дна заняты почвами. Пески развиты слабо. Серый ил, образовавшийся за счет аллювиальных наносов, расположен на глубинах больше 6 м. В верховьях плёсов он встречается и на меньших глубинах, так как ветровое волнение благодаря небольшим разгонам волн здесь развито слабо. Слабое развитие волнения способствует сохранению почв и ограничивает образование вторичных песков. Площади, занятые переходным и торфянистым илами, в речных плёсах очень незначительны (рис. 29).

Главный плёс водохранилища по характеру распределения грунтов делится на 2 части — восточную и западную. Граница между ними проходит по линии Центральный мыс на севере, Рожновский мыс — на юге. К востоку от этой границы илистые отложения представлены главным образом торфянистым илом и залегают ниже изобаты 10 м. Исключение составляют несколько участков у всплывших торфяников вблизи Центрального мыса и заостровные пространства у восточного берега водохранилища, где торфянистые илы встречаются в диапазоне глубин 0—7 м. Это связано с близостью источников грунтообразующего материала и малой гидродинамической активностью водных масс.

Пески в рассматриваемом районе Главного плёса обычно встречаются до глубины 5—6 м. Исключение составляет прибрежный район у восточного берега, где вследствие преобладания ветра северо-западного направления развивается сильное волнение и пески распространяются на бо́льшие глубины. При отсутствии в прибрежной полосе остатков затопленной древесной растительности, гасящей волнение, пески начинаются от уреза

воды. При наличии зарослей пески распространяются в глубь водоема от их нижней границы.



29. Схема распределения донных отложений Рыбинского водохранилища по материалам грунтовой съемки 1955 г.

1 — всплывшие торфяники, 2 — почвы, 3 — песок и илистый песок, 4 — песчанистый серый и серый ил, 5 — переходный ил, 6 — торфянистый ил.

Во время первого картирования донных отложений Рыбинского водохранилища, выполненного в 1955 г., на значительных пространствах дна водоема сохранились затопленные почвы.

В сохранении их большое значение имело защитное действие затопленной древесной растительности, гасящей волнение и тем самым препятствующей размыву первичных грунтов. Только ниже 10-метровой изобаты первичные грунты оказались погребенными илистыми отложениями.

Переходный ил, отлагающийся на тех же глубинах, что и другие илистые отложения, занимал в восточной части Главного плёса очень небольшие площади.

В западной части Главного плёса в отличие от восточной преобладают серые илы, образующиеся при отложении продуктов размыва ложа водоема и остатков органического происхождения. Торфянистые илы в этом районе отсутствуют. Значительные площади дна заняты песками и почвами. Распределение этих грунтов подчиняется закономерностям, отмеченным для восточной части плёса.

Таким образом, в 1955 г. основные типы донных отложений в Рыбинском водохранилище занимали следующие площади: незаиленные почвы — 55%, песчанистые серые и серые илы — 8, пески и илистые пески — 20, торфянистый ил — 13 и переходный ил — 4% (Курдин, 1959). Торф и отложения из макрофитов в Рыбинском водохранилище встречаются редко. Торф в большинстве случаев оказался погребенным под вторичными отложениями или всплыл. Грунты из макрофитов приурочены к очень небольшим, совершенно изолированным от волнения участкам.

В каждом из рассмотренных водохранилищ распределение донных отложений имеет свои особенности и представляет собой довольно пеструю картину. Величины площадей, занятых различными грунтами в верхневолжских водохранилищах (% от общей площади), приведены ниже. Если в Рыбинском водохранилище к 1955 г. незаиленные почвы составляли 55%, то в Угличском — только 19% от общей площади. В противоположность Рыбинскому водохранилищу в Иваньковском и Угличском обширные площади дна оказались занятыми песчанистым серым и серым илами. В двух последних водохранилищах торфянистый ил отсутствует, а в Рыбинском водохранилище им покрыто 13% площади дна. В Иваньковском водохранилище большее распространение по сравнению с другими водоемами имеют отложения из макрофитов.

Тип грунта	Иваньковское	Угличское	Рыбинское
Незаиленные почвы	41	19	55
Пески и илистые пески	10	17	20
Песчанистые серые и серые илы	45	64	8
Торфянистый ил	—	—	13
Переходный ил	—	—	4
Отложения из макрофитов . .	4	<1	<1

Песчаные грунты прибрежья и открытых пространств занимают незначительные площади в Иваньковском водохранилище,

почти отсутствуют в Угличском и очень распространены в Рыбинском.

Несмотря на существенные различия имеются и общие черты в характере распределения донных отложений в этих водоемах. Как правило, на русловых участках всех водохранилищ, подверженных влиянию стоковых течений, преобладают пески. В озерных частях Иваньковского и Рыбинского, а также на приплотинном участке Угличского водохранилища имеют место илистые отложения. В зависимости от гидродинамической активности вод на этих участках, и прежде всего от размеров волнения, ограничивающего распространение ила, глубины, на которых начинают появляться илы, различны. В Иваньковском водохранилище критической глубиной, ниже которой вероятность трансседиментации очень мала и которая является верхней границей распространения илистых отложений в открытых частях водоема, можно считать 4 м, в Угличском — 2 м, а в Главном плёсе Рыбинского, где волнение наиболее интенсивно, — 10 м (Курдин, 1961б).

Участки речных плёсов водохранилищ, граничащие с озеровидными расширениями, обычно заняты серыми илами аллювиального происхождения. Илистые грунты таких участков Рыбинского водохранилища залегают на меньших глубинах, чем в Главном плёсе. Здесь они появляются уже на 6-метровой глубине.

Заканчивая описание распределения грунтов в верхневолжских водохранилищах, следует еще раз подчеркнуть, что резких границ между основными типами донных отложений не существует. Между ними обычно залегают отложения переходного типа. В зоне переходных отложений наиболее резко изменяется механический состав грунта.

Рассмотренные особенности распределения грунтов в верхневолжских водохранилищах получены спустя около двух десятилетий после создания этих водоемов. Повторные грунтовые съемки, выполненные через 10 лет, показали, что в Иваньковском и Угличском водохранилищах соотношение площадей, занимаемых различными грунтами, а также высотное положение границ между отдельными типами отложений сохранились. Можно считать, что в этих водохранилищах устойчивый грунтовый комплекс сформировался уже в течение первых двух десятилетий. В дальнейшем состав грунтового комплекса (т. е. набор типов отложений, в него входящих) и закономерности распределения грунтов не претерпели существенных изменений.

Повторная грунтовая съемка Рыбинского водохранилища выявила ряд существенных изменений в распределении грунтов. Отмечено продвижение песчанистых отложений в глубь водоема. Вторичные пески, имевшие нижнюю границу в Главном плёсе на глубине 5—6 м, а в речных плёсах — на 3—4,5 м, продвинулись до глубин 7—8 м, а на некоторых участках Главного плёса — до 8—10 м. На глубинах 8—10 м в Главном плёсе появились явные признаки эрозии почв. Наблюдается замещение незаилен-

Размываемый берег в Волжском плёсе Рыбинского водохранилища.

ных ранее почв пылеватым песком или песчанистым илом. Местами толщина слоя песчанистых отложений достигает нескольких сантиметров. Одновременно с распространением песков в глубь водоема в Главном плёсе водохранилища отмечены сокращение площадей, занимаемых торфянистым и переходными илами, и постепенное замещение их серым илом.

Причина указанных изменений в распределении грунтов заключается в изменениях гидродинамической активности водной массы и роли отдельных источников грунтообразующего материала в процессах осадкообразования.

ГЛАВА VI

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Наличие различных по происхождению грунтов, особенности их распределения и специфичность режима верхневолжских водохранилищ обусловливают различие физических и химических свойств донных отложений.

Механический состав

Механический состав донных отложений верхневолжских водохранилищ характеризуется большим количеством анализов проб, произведенных методом отмучивание—фракциометр—пипетка. (Методика изложена в главе II). При этом при определении механического состава донных отложений использовалась классификация Н. М. Страхова и др. (1954), основанная на величине среднего диаметра частиц.

Результаты обработки данных гранулометрического анализа по отдельным водоемам (табл. 17) показывают, что в большинстве случаев в донных отложениях верхневолжских водохранилищ отсутствуют частицы крупнее 0.5 мм. Исключение составляют отдельные участки в верховьях речных плёсов, где на хорошо промываемых в весеннее половодье небольших участках русел рек сохраняются крупные пески. Мелкозернистость отложений рассматриваемых водоемов связана прежде всего с тем, что исходным материалом для их образования послужили залитые почвы, продукты размыва берегов и ложа, сложенных тонкими аллювиальными, а в районе Рыбинского водохранилища аллювиально-озерными отложениями, разложившиеся органические остатки.

Для более детальной характеристики гранулометрического состава донных отложений различных типов остановимся на описании их в каждом водоеме.

Таблица 17

Механический состав (% от сухого веса), коэффициенты сортировки (S_0), асимметрии (S_k) и медианный диаметр (M_d) грунтов Иваньковского водохранилища

№ станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Максимальная молекулярная влагоемкость	Пределы фракций, мм							S_0	S_k	M_d, мм
				>1.0	1.0—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	<0.01			
	Волжский плёс												
2	Крупный песок . . .	2.5	0.9	10.5	50.2	37.6	0.4	0.4	0.7	0.2	1.52	0.87	0.60
7	То же	7.4	1.9	4.3	56.0	37.4	0.7	Следы	1.4	0.2	1.41	0.83	0.60
38	Средний илистый песок	12.5	8.9	—	5.6	31.8	24.4	9.0	20.4	8.8	2.76	0.49	0.15
46	Песчанистый серый ил	13.4	19.7	—	—	Следы	6.8	46.0	32.0	15.2	2.06	0.53	0.054
67	То же	10.4	15.7	—	0.6	10.4	11.2	33.8	28.8	15.2	2.09	0.60	0.057
69	Крупный песок . . .	15.3	1.1	20.8	72.0	6.6	Следы	Следы	0.4	0.2	1.29	0.91	0.80
25	Отложение из макрофитов	2.2	55.6	—	—	2.2	4.0	6.8	52.8	34.2	2.00	1.18	0.015
45	Песчаная почва . . .	3.2	15.2	—	Следы	0.8	21.2	44.0	24.8	9.2	1.65	0.79	0.065
	Иваньковский плёс												
78	Песчанистый серый ил	15.5	20.2	—	Следы	0.2	3.2	43.6	40.0	13.0	2.03	0.63	0.046
106	То же	4.8	15.7	—	5.0	26.0	12.2	22.2	24.2	10.4	2.82	1.34	0.076
95	» »	6.1	22.4	—	Следы	2.0	14.0	36.2	23.2	24.6	2.80	0.35	0.052
112	» »	17.7	23.5	—	»	0.6	2.2	36.6	33.2	27.4	2.71	0.54	0.033
141	» »	5.7	25.8	—	0.4	3.8	10.2	26.8	33.8	25.0	2.76	0.58	0.036
124	» »	18.2	23.6	—	2.6	8.4	5.0	27.0	32.6	24.4	2.71	0.56	0.040
147	Серый ил	9.1	24.8	—	2.4	3.2	9.2	31.6	23.0	30.6	3.54	0.35	0.042
138	Песчанистый серый ил	4.2	13.5	—	1.4	33.8	18.0	16.0	19.4	11.6	2.78	0.66	0.12
1	То же	5.3	34.8	—	Следы	2.4	10.4	38.8	22.4	26.0	3.06	0.28	0.052
72	Песчанистый темно-серый ил	11.4	35.4	—	»	2.8	11.0	39.8	18.0	28.4	3.54	0.19	0.057
123	Крупный песок . . .	1.1	1.1	3.8	55.7	39.0	0.5	0.5	Следы	0.5	1.46	0.90	0.57

№ станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Пределы фракций, мм							S_0	S_k	M_d, мм
				>1.0	1.0—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	<0.01			
	Шошинский плёс												
214	Крупный песок . . .	7.3	4.8	23.2	42.6	24.0	2.7	1.7	4.4	1.4	1.60	0.84	0.66
199	Песчанистый серый ил	3.4	18.0	—	Следы	0.8	16.4	44.6	20.0	18.2	2.24	0.42	0.062
175	То же	11.4	17.7	—	»	2.4	15.4	34.6	23.6	24.0	2.71	0.36	0.054
177	» »	3.6	18.8	—	»	4.8	13.4	30.6	28.2	23.0	1.92	0.75	0.12
184	Мелкий илистый песок	1.8	13.1	—	3.4	21.4	33.8	17.2	14.6	9.6	2.54	0.43	0.046
170	Песчанистый серый ил	10.6	17.8	—	Следы	2.0	16.2	33.4	31.4	17.0	1.99	0.71	0.052
169	То же	3.4	17.7	—	»	1.4	6.6	33.6	39.6	18.8	2.24	0.68	0.038
40	» »	11.5	22.1	—	»	0.2	9.6	39.2	30.2	20.8	2.40	0.49	0.048
157	Отложение из макрофитов	2.2	61.5	—	»	2.0	9.8	33.4	21.0	33.8	4.07	0.31	0.037

Примечание. S_0 для отложений из макрофитов (ст. 25 и 157) характеризует соотношение размеров частиц, образовавшихся при измельчении массы растительных остатков в результате ее разложения, поскольку в процессе своего формирования эти грунты не подвергаются механическому воздействию воды. Станции расположены по длине плёсов от верховьев к плотине.

Таблица 18

Механический состав (% от сухого веса), гранулометрические коэффициенты и потеря в весе при прокаливании (п. п. п.) грунтов Угличского водохранилища

Местоположение станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Пределы фракций, мм								Сумма фракций			M_d, мм	S_0	S_k	П. п. п., %
			>0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001	>0.5—0.1	0.1—0.01	<0.01				
В 1.5 км ниже Иваньковской ГЭС	Крупный песок	7.1	81.4	17.2	Следы	Следы	Следы	1.4*	—	—	98.6	Следы	1.4	0.69	1.26	0.95	0.8
В 17 км ниже Кимр	То же	11.8	56.3	35.2	6.1	0.7	1.0	0.7*	—	—	97.6	1.7	0.7	0.58	1.76	0.79	0.9
В 4 км ниже р. Нерли	Серый песчанистый ил	15.0	Следы	0.3	10.2	54.5	24.6	5.2	4.2	1.0	10.5	79.1	10.4	0.06	1.61	0.72	9.4
В 7 км ниже р. Нерли	То же	2.8	»	2.0	16.5	42.8	24.5	9.5	2.2	2.5	18.5	67.3	14.2	0.06	1.82	0.66	9.6
В 6 км выше Углича	Серый ил	22.8	»	0.5	4.5	22.7	39.8	19.0	5.0	8,5	5.0	62.5	32.5	0.03	2.64	0.57	9.0
В 6.5 км выше Углича	То же	7.9	0.7	4.1	6.5	22.5	25.8	21.5	12.2	6.7	11.3	48.3	40.4	0.02	3.42	0.67	4.3
В 2 км выше Углича	»	22.1	Следы	4.0	3.2	14.7	31.5	19.8	20.8	6.0	7.2	46.2	46.6	0.01	3.04	1.17	10.9

Примечание. Звездочкой отмечена сумма фракций меньше 0.01 мм.

Результаты механического анализа основных типов донных отложений Иваньковского водохранилища по плёсам показывают, что крупные пески, расположенные в верховьях плёсов, состоят преимущественно из частиц 1.0—0.5 мм (табл. 17). Эта фракция составляет в них свыше 50%. Содержание частиц свыше 1.0 мм не превышает 23%. Изменение механического состава грунтов от верховьев плёсов к плотине происходит постепенно. Песчанистый серый ил, залегающий ниже критических отметок, в Иваньковском и Шошинском плёсах имеет одинаковый механический состав независимо от рельефа дна. Он состоит преимущественно из частиц размером 0.1—0.01 мм, которых содержится обычно около 60—80%. Выше критических отметок в соответствии со средней глубиной в навигационный период и расстоянием от абразионных берегов дисперсность грунтов меняется в широком диапазоне — от крупных песков до песчанистых илов (станции 123, 138, 169, 184). Общим для всех плёсов водохранилища является уменьшение дисперсности вторичных отложений к их верховьям.

Данные механического анализа донных отложений позволили вычислить гранулометрические коэффициенты (табл. 19). Значения S_0 показывают, что существенных различий в сортировке грунтов отдельных плёсов водохранилища не наблюдается. Наиболее хорошо сортированы пески различной крупности, несколько хуже остальные грунты ($S_0>2$). Колебания коэффициента сортировки S_0 для конкретного типа грунта зависят от местных условий, определяющих гидродинамическую активность вод на участке его расположения.

Коэффициенты ассимметрии S_k различных типов отложений Иваньковского водохранилища, за редким исключением, меньше единицы. Это означает, что максимальное содержание фракций находится в половине, состоящей из частиц крупнее медианного диаметра. Величина медианного диаметра M_d у крупного песка превышает 0.5 мм, а у илистых грунтов колеблется около 0.05 мм. Классифицируя илы водохранилища по M_d и используя терминологию, принятую для морских осадков, меньшую часть илистых грунтов Иваньковского водохранилища следует отнести к мелкоалевритовым ($M_d<0.05$ мм), а остальные — к крупноалевритовым илам (Леонтьев и др., 1959).

Механический состав основных типов донных отложений Угличского водохранилища (табл. 18) показывает четкую картину увеличения дисперсности частиц донных отложений по длине водоема. Содержание песчанистых частиц размером более 0.1 мм убывает с 98.6% в русловом участке водохранилища до 5.0—18.5% на приплотинной его части. Содержание илистых частиц менее 0.01 мм возрастает в том же направлении от 0.7 до 46.6%. Сумма же фракций, представленных размерами частиц 0.1—0.01 мм, достигает максимальных значений при переходе руслового участка в долинный, у расширения в районе плёса р. Нерли.

Механический состав, гранулометрические коэффициенты и потеря в весе при прокаливании (% от сухого веса) донных отложений Рыбинского водохранилища

№ станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Пределы фракций, мм								S_0	Md	S_k	П. п. п., %
			1.0—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001				
	Волжский плёс													
5	Серый песчанистый ил	6.8	0.2	11.2	10.4	38.4	15.2	24.6*	—	—	3.04	0.06	0.25	9.7
6	Серый ил	8.8	Следы	0.2	6.0	39.8	23.2	18.8	9.5	2.5	3.18	0.05	0.20	21.7
20	То же	18.0	»	0.2	1.8	35.0	26.3	19.0	15.5	2.2	—	—	—	21.8
124	Пылеватый песок . .	3.5	»	1.5	25.2	59.6	3.8	8.2	—	—	—	—	—	0.8
	Моложский плёс													
54	Средний песок . . .	7.9	27.7	56.0	10.8	0.9	2.3	2.3*	—	—	1.48	0.38	0.93	0.5
57	Мелкий илистый песок	12.5	Следы	24.0	40.0	28.7	0.6	6.7*	—	—	1.50	0.12	1.31	0.9
59	Средний илистый песок	17.0	»	60.0	15.1	14.6	0.9	9.4*	—	—	1.92	0.25	0.61	2.4
109	Серый песчанистый ил	5.5	»	9.0	18.2	37.0	9.5	26.3*	—	—	3.44	0.07	0.20	16.0
	Шекснинский плёс													
34	Серый ил	7.5	Следы	3.4	20.4	24.2	9.5	42.5*	—	—	—	—	—	12.6
38	Торфянистый ил . .	11.1	—	8.2	13.2	22.6	21.2	34.8*	—	—	—	—	—	50.6
143	Песчаная почва . . .	6.7	0.2	2.3	37.0	47.5	7.5	5.5*	—	—	1.38	0.09	1.00	4.5
147	Серый ил	8.3	0.8	5.6	4.4	21.2	10.6	57.4*	—	—	3.87	0.01	3.00	14.9
149	Песчаная почва . . .	3.4	Следы	1.2	50.3	35.2	6.5	6.8*	—	—	1.47	0.10	0.92	3.2
151	Серый песчанистый ил	8.4	»	5.6	18.0	41.2	11.4	23.8*	—	—	2.40	0.06	0.40	16.6
152	Переходный ил . . .	9.2	»	0.9	10.2	43.2	13.7	32.0*	—	—	3.12	0.06	0.19	33.8
157	Пылеватый песок . .	4.0	20.4	10.7	24.6	41.0	2.6	0.7*	—	—	—	—	—	0.6

Таблица 19 *(продолжение)*

№ станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Пределы фракций, мм								S_0	Md	Sk	П. п. п., %
			1.0—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001				
	Главный плёс													
21	Серый песчанистый ил	13.5	Следы	0.2	7.5	49.5	20.3	22.5*	—	—	—	—	—	12.6
22	Супесчаная почва . .	8.2	0.2	1.8	3.2	68.2	13.9	12.7*	—	—	1.30	0.06	0.86	13.9
25	Торфянистый ил . .	11.3	Следы	2.4	10.2	30.8	20.0	36.6*	—	—	3.31	0.04	0.39	56.2
40	То же	4.4	Следы	1.1	5.0	20.8	13.1	60.0*			3.72	0.01	1.67	62.4
42	Песчаная почва . . .	4.6	»	1.5	16.5	64.5	8.2	9.3*			1.24	0.08	0.93	6.0
46	Пылеватый песок . .	4.4	»	0.6	26.0	66.9	1.7	4.8*			1.16	0.09	0.94	0.5
50	Супесчаная почва . .	7.6	»	1.7	8.6	70.0	6.9	12.8*			1.18	0.07	0.96	24.6
62	Серый песчанистый ил	13.0	»	0.8	10.2	65.5	7.0	16.5*						7.1
65	Серый ил	17.5	»	0.7	6.0	32.3	15.3	45.7*			3.60	0.03	0.50	22.6
73	Торфянистый ил . .	21.5	»	9.6	15.2	31.6	12.8	30.8*			3.54	0.06	0.22	42.2
97	Средний песок . . .	3.5	20.2	50.0	7.3	4.3	18.0	0.2*			1.84	0.31	0.66	0.5
125	Мелкий песок	7.0	1.4	36.0	47.2	7.4	3.1	4.9*			1.36	0.18	1.06	1.5
159	Торфянистый ил . .	9.7	Следы	3.0	17.6	37.4	8.0	34.0*			3.58	0.06	0.18	60.1

Примечание. Звездочкой отмечена сумма фракций меньше 0.01 мм.

Процесс сортировки частиц отложений по длине водоема характеризуется коэффициентом сортировки. По мере удаления от Иваньковской ГЭС грунты с высокой степенью сортировки ($S_0=1.26$) сменяются плохо сортированными ($S_0>3.0$). Это свидетельствует об аккумуляции взвесей без последующей активной пересортировки частиц грунта в долинной части водохранилища.

Величина и изменение коэффициентов асимметрии аналогичны таковым для Иваньковского водохранилища. Только на приплотинном участке Угличской ГЭС значения S_k больше единицы. Величина M_d частиц уменьшается от 0.69 мм в нижнем бьефе Иваньковского гидроузла до 0.01 мм в нижней части долинного участка водохранилища.

Характерной особенностью механического состава донных отложений Рыбинского водохранилища является почти полное отсутствие частиц больше 0.5 мм (табл. 19). Исключение составляют русловые участки плёсов (ст. 54), где на промываемых в весеннее половодье участках русел сохраняются средние пески, и участки мелководий водохранилища, на которых образовался плащ песчаных наносов (станции 97 и 157).

Первичные грунты, песчаные и супесчаные почвы, состоят преимущественно из мелкопесчанистых (0.2—0.1 мм) и пылеватых (0.1—0.01 мм) частиц. Сумма этих фракций, как правило, не превышает 80%.

Во вторичных грунтах, пылеватых илистых песках и песках и в песчанистых илах преобладают пылеватые частицы — до 70%. В средних песках доминируют среднепесчанистые частицы (0.5—0.2 мм) — до 60%. В илах обычно преобладают пылеватые частицы (35—65%), причем сумма илистых и глинистых частиц (<0.01 мм) в некоторых пробах может достигать 60%.

В одном и том же грунте в различных частях водохранилища содержание одноразмерных фракций примерно одинаково (табл. 19). При переходе от песчаных грунтов к илистым в распределении фракций наблюдается двувершинность, указывающая на плохую сортировку частиц в илах ($S_0>2$). Для данного водоема характерна плохая сортировка частиц серых и особенно торфянистых илов, что свидетельствует о слабой гидродинамической активности водных масс на участках их залегания. В этих случаях значения $S_0>3.0$.

Значения коэффициентов асимметрии, как и в выше расположенных водохранилищах, обычно меньше единицы, но и в них, как и в значениях S_0, наблюдаются существенные колебания.

В Рыбинском водохранилище отмечен максимальный для верхневолжских водохранилищ коэффициент асимметрии илистых отложений, равный 3 (ст. 147), свидетельствующий о резком сдвиге вправо от медианы фракции с максимальным содержанием частиц. Величина медианного диаметра частиц в большинстве случаев менее 0.1 мм, но на отдельных участках водохранилища колеблется в значительных пределах (табл. 19).

Особенности сортировки донных отложений в Рыбинском водохранилище хорошо прослеживаются на примере формирования грунтов банки Лысая Гора, которая расположена у западного берега расширенной части Волжского плёса. Исходными грунтами для образования вторичных отложений, покрывающих банку, послужили серые супесчаные почвы, в которых преобладают пыле-

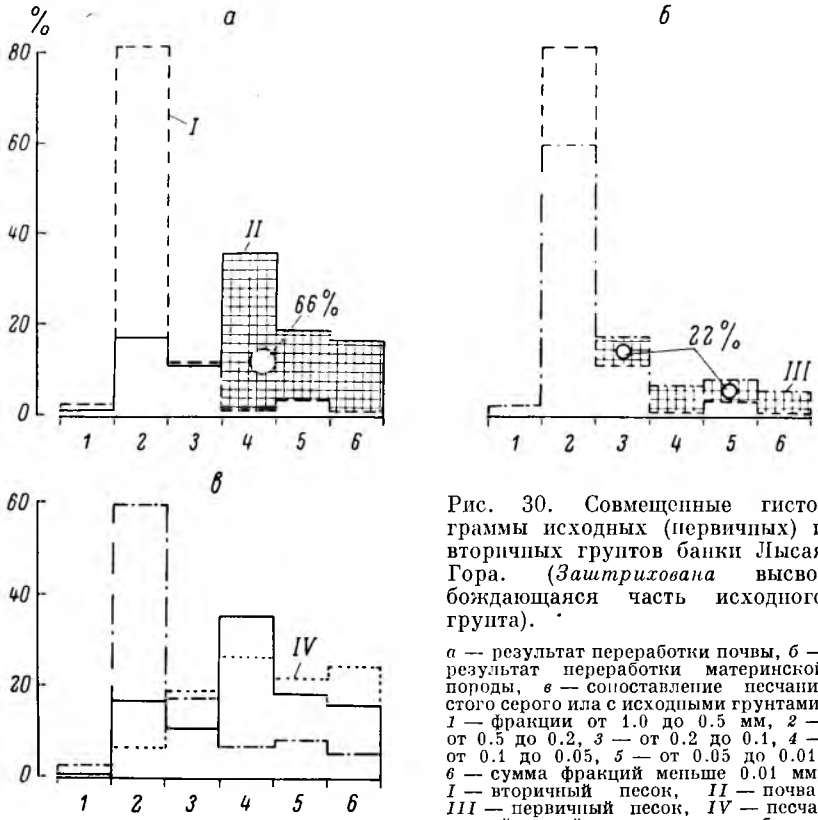


Рис. 30. Совмещенные гистограммы исходных (первичных) и вторичных грунтов банки Лысая Гора. (*Заштрихована* высвобождающаяся часть исходного грунта).

а — результат переработки почвы, *б* — результат переработки материнской породы, *в* — сопоставление песчанистого серого ила с исходными грунтами. *1* — фракции от 1.0 до 0.5 мм, *2* — от 0.5 до 0.2, *3* — от 0.2 до 0.1, *4* — от 0.1 до 0.05, *5* — от 0.05 до 0.01, *6* — сумма фракций меньше 0.01 мм. *I* — вторичный песок, *II* — почва, *III* — первичный песок, *IV* — песчанистый серый ил у подошвы банки.

ватые частицы, имеющие M_d, равный 0.07 мм, и материнская порода, представленная средним желтым песком, M_d которого 0.22—0.29 мм.

При размыве и переработке первичных грунтов происходила сортировка слагающих их частиц по крупности. В процессе сортировки наиболее крупные частицы оставались вблизи места размыва, так как с увеличением глубины размывающая и транспортирующая способность течений, вызываемых волнением, падает. Более мелкие частицы удалялись из района переработки грунта.

В результате переформирования первичных грунтов происходило нивелирование поверхности банки (рис. 24), и на ней обра-

Таблица 20

Механический состав грунтов банки Лысая Гора и прилегающих к ней участков Волжского плёса (% от сухого веса), коэффициенты сортировки (S_0), асимметрии (S_k) и медиана (M_d)

№ станции	Грунт	Пределы фракций, мм								Сумма фракций			S_0	S_k	M_d
		1.0—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001	(0.1—1.0)	(0.01—0.1)	(<0.01)			
Банка Лысая Гора															
96	Супесчаная почва	0.3	17.3	17.0	27.0	26.4	12.0*	—	—	34.6	53.4	12.0	2.26	0.94	0.07
110		1.2	14.8	8.8	45.3	12.8	9.2	6.7	1.2	24.8	58.1	17.1	1.69	0.68	0.07
116		0.5	19.2	13.0	26.3	24.7	8.3	6.0	2.0	32.7	51.0	16.3	2.58	0.84	0.07
27	Подпочвенный слой (песок)	1.5	52.3	23.0	10.7	8.0	2.5	1.0	1.0	76.8	18.7	4.5	1.84	0.80	0.22
115		3.2	67.5	11.5	3.2	8.3	6.3*	—	—	82.2	11.5	6.3	1.58	0.78	0.29
57	Средний желтый песок	5.2	77.5	11.8	0.8	3.2	1.5*	—	—	94.5	4.0	1.5	1.33	0.92	0.33
72		1.0	85.2	9.5	1.0	2.8	0.5*	—	—	95.7	3.8	0.5	1.32	0.92	0.33
114		0.5	82.5	11.2	0.8	4.0	1.0*	—	—	94.2	4.8	1.0	1.34	0.92	0.32
39	Песчанистый серый ил	Следы	4.7	31.3	21.6	28.7	6.7	3.0	4.0	36.0	50.3	13.7	2.28	0.71	0.07
124		»	7.6	18.6	26.0	23.4	9.0	11 7	3.7	26.2	49.4	24.4	3.10	0.42	0.05
130		»	6.3	19.6	27.5	20.6	10.0	11.7	4.3	25.9	48.1	26.0	3.42	0.29	0.06
Волжский плёс															
295	Песчанистый серый ил	Следы	1.8	12.0	50.0	22.2	8.5	4.5	1.0	13.8	72.2	14.0	1.73	0.66	0.06
340	Серый ил	»	0.2	6.0	39.8	23.2	18.8	9.5	2.5	6.2	63.0	30.8	2.90	0.41	0.01
376	Песчанистый серый ил	0.2	0.8	14.5	48.3	16.5	9.5	7.0	3.2	15.5	64.8	19.7	1.98	0.95	0.06

Примечание. Звездочкой отмечена сумма фракций меньше 0.01 мм.

зовались средние желтые пески, M_d которых обычно больше 0.30 мм. Подошва банки оказалась покрытой серым песчанистым илом, имеющим M_d частиц 0.05—0.07 мм, который распространился и на прилегающую к банке площадь дна водоема. Величины медианных диаметров грунтов банки позволяют сделать заключение о сходстве гранулометрического состава песков, покрывающих вершину банки, и о резком увеличении дисперсности частиц отложений у ее подошвы. Наблюдается также некоторое увеличение медианного диаметра на северо-восточной стороне банки, которая принимает на себя волну, имеющую наибольший разгон.

Для представления о количестве высвободившегося грунта и установления размеров составляющих его частиц сопоставим механический состав первичных и вторичных грунтов путем совмещения гистограмм (рис. 30), которые построены по средним значениям для каждого типа грунта, полученным как среднее арифметическое из представленных данных (табл. 20). При переработке супесчаной почвы (рис. 30, *а*) почти полностью высвобождаются частицы меньше 0.1 мм и частично менее 0.2 мм. Общее количество удаленных частиц указанных фракций составляет около 66% первичного грунта. При переработке подпочвенного грунта (рис. 30, *б*) высвобождаются те же фракции, что и в первом случае. В количественном отношении к исходному грунту они также дают довольно большую величину, равную 22%. Вынесенные за пределы банки фракции образуют серый песчанистый ил (рис. 30, *в*). В составе этого ила отсутствуют крупнопесчанистые частицы размером 1.0—0.5 мм, уменьшается по сравнению с исходными грунтами количество среднепесчанистых частиц — от 0.5 до 0.2 мм, но возрастает содержание частиц мелкого песка — 0.2—0.1 мм. Присутствие в сером песчанистом иле среднепесчанистых частиц дает основание предполагать существование потока наносов из песка, высвободившегося при переработке грунтов банки. По всей вероятности, этот поток быстро затухает, так как общее количество песчанистых частиц, входящих в состав ила за пределами банки, на 16% меньше, чем в иле, образовавшемся у ее подошвы (Курдин, 1965). Таков в общих чертах механизм процесса сортировки частиц донных отложений в водохранилищах.

Таким образом, в результате анализа данных механического состава удалось установить характерные гранулометрические показатели для основных типов грунтов верхневолжских водохранилищ (табл. 17—19). Механический состав донных отложений и величины гранулометрических коэффициентов для отдельных типов отложений в рассматриваемых водохранилищах мало различаются между собой. В одном и том же типе грунта одноразмерные фракции содержатся примерно в одинаковых количествах во всех трех водохранилищах. Однако сортировка частиц донных отложений на отдельных участках водохранилищ неодинакова. Особенно плохой сортировкой отличаются торфянистый и переходный илы.

Интересно сопоставить гранулометрический состав донных отложений верхневолжских водохранилищ с таковым современных отложений естественных озер.

Сравнение с Ладожским озером, по которому имеются материалы обстоятельного исследования Н. И. Семеновича (1966), свидетельствует, что в процессе современного осадкообразования как в естественных, так и в искусственных водоемах формируются одни и те же типы гранулометрического состава отложений, начиная от песков различной крупности и кончая илами. Медианные диаметры всех типов отложений и показатели сортировки частиц весьма близки между собой, а распределение различных гранулометрических типов осадков по площади целиком определяется гидродинамическими процессами в водной массе водоема.

Химический состав

Сведения о валовом химическом составе донных отложений верхневолжских водохранилищ немногочисленны и ограничиваются результатами анализов девяти проб илов Иваньковского и одной пробы илов Рыбинского водохранилища (Драчев, 1969; Драчев, Кудрявцева, 1974). В Иваньковском водохранилище анализы выполнены для проб песчанистого серого ила (табл. 21, 22). Основной компонент этих илов — кремнекислота, содержание которой колебалось в исследованных пробах от 53 до 70%. Минимальное количество ее относится к пункту с. Городня в Волжском плёсе водохранилища, максимальное обнаружено в Мошковичском заливе. Такая же закономерность отмечена в содержании алюминия и железа. Повышенное содержание кремнекислоты и полуторных окислов в пробе донных отложений Мошковичского залива авторы объясняют участием в их образовании продуктов размыва древнеаллювиальных отложений. Древнеаллювиальные отложения были вскрыты в процессе дноуглубительных работ в заливе в период, предшествовавший пуску Конаковской ГРЭС, сбрасывающей в залив воды охлаждения.

Среднее содержание P_2O_5 в илах глубоководной части водохранилища 0.31%. Наиболее богаты фосфором отложения у с. Городни (в полтора раза выше среднего). Следует отметить, что приводимые показатели относятся к самому верхнему тонкому полужидкому слою ила, так как отбор проб осуществляется плососом Перфильева. Этим же объясняются отмеченные сезонные колебания в составе ила (табл. 21, 22). Одной из причин колебаний в составе отложений по акватории авторы считают различия в гранулометрическом составе исследованных проб, в частности в содержании песчанистой фракции. Анализ тонкодисперсной фракции поверхностного слоя илов Иваньковского плёса водохранилища показал, что в ней увеличивается содержание органического вещества (в среднем до 17%), уменьшается содержание кремнекислоты (в среднем до 49%), повышается содержание по-

Таблица 21

Валовой состав донных отложений Иваньковского водохранилища, % на сухое вещество (по: Драчев, Кудрявцева, 1974)

Дата	Станция	Глубина, м	Потеря при прокаливании	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	MnO	K_2O	Na_2O	Сумма
19 V 1968	В 5 км выше плотины	17.0	11.28	63.11	5.43	10.14	2.34	1.67	1.00	0.28	0.10	3.20	0.86	99.41
28 IX	Там же	16.0	9.89	68.39	5.13	8.83	1.93	1.37	0.97	0.29	0.13	2.97	—	—
24 V	Корчева	16.0	9.81	64.45	4.92	9.88	3.32	1.57	0.67	0.30	0.13	3.20	0.85	99.11
28 IX	»	15.5	12.81	58.61	6.88	11.76	2.76	1.96	1.11	0.41	0.27	2.97	0.82	100.36
30 IX	»	12.0	10.15	62.53	5.50	10.64	3.30	2.15	0.82	0.31	—	3.01	0.82	99.23
29 IX	Мошковичский залив	—	11.44	70.38	3.33	6.41	2.46	1.36	1.01	0.26	0.09	2.46	0.81	100.01
1 X	Городня	10.0	14.31	53.27	8.00	12.14	3.78	2.22	0.98	0.53	0.26	—	—	—

Таблица 22

Валовой состав донных отложений Иваньковского водохранилища, % на прокаленное вещество (по: Драчев, Кудрявцева, 1974)

Дата	Станция	Глубина, м	Si	Fe	Al	Ca	Mg	S	P	Mn	K	Na	Сумма
19 V 1968	В 5 км выше плотины	17.0	33.01	4.25	6.10	1.87	1.27	0.45	0.13	0.08	2.97	0.71	50.84
28 IX	Там же	16.0	35.45	3.97	5.18	1.53	0.91	0.43	0.14	0.11	—	—	—
24 V	Корчева	16.0	33.41	3.81	5.80	2.63	1.05	0.29	0.14	0.11	2.92	0.69	47.72
28 IX	»	15.5	31.20	5.48	7.09	2.24	1.34	0.50	0.20	0.24	2.80	0.69	51.78
30 IX	Конаково	12.0	32.41	4.26	6.25	2.61	1.43	0.36	0.15	0.00	2.77	0.67	50.88
	Среднее	—	33.09	4.35	6.08	2.17	1.20	0.40	0.15	0.13	2.86	0.68	50.30
29 IX	Мошковичский залив . .	—	36.81	2.61	3.80	1.96	0.91	0.45	0.12	0.07	2.31	0.67	49.71
1 IX	Городня	10.0	28.85	6.45	7.45	3.13	1.55	0.45	0.26	0.23	—	—	—

луторных окислов (до 23%) по сравнению с содержанием этих компонентов в нефракционированных илах. В тонкодисперсной части илов содержится также больше окиси серы — 2.84% и соединений фосфора — 0.61%. Данные, полученные С. М. Драчевым и Н. А. Кудрявцевой, свидетельствуют о близости минерального состава донных отложений Иваньковского водохранилища к составу аллювиальных почв долины Волги и главных ее притоков (Афанасьева, 1940; Грабовская, 1940). Отмеченное сходство опре-

Открытые мелководья Главного плёса Рыбинского водохранилища, подверженные размыву.

делено тем, что в формировании почв речных долин, так же как и в формировании современных донных отложений, принимали участие взвешенные наносы рек, приносимые в период половодья. Продукты размыва берегов и мелководных участков водоема, являющиеся в основном аллювиальными и древнеаллювиальными отложениями речных долин, составляют (как показано в главе III) главную долю грунтообразующего материала в Иваньковском водохранилище.

Сопоставление илов водохранилища с различными типами озерных отложений показало, что наиболее близки по составу к илам водохранилища мелкоалевритовые илы олиготрофного Ладожского озера (Семенович, 1966). Различия заключаются в более высоком содержании органического вещества (потеря при прокаливании вдвое больше), серы (в 7 раз больше) в илах водохранилища. Содержание марганца в 4 раза ниже, чем в илах

озера, и близко к содержанию его в почвах водосбора водохранилища.

Валовой химический состав ила Рыбинского водохранилища определен С. М. Драчевым (1971) на одной станции, расположенной на правой затопленной пойме р. Шексны у убежища Средний Двор (глубина 11 м). В этой работе не указан тип ила, однако, судя по содержанию органического вещества, анализу подвергнут песчанистый серый ил. Так же, как и в Иваньковском водохранилище, в Рыбинском отмечается сходство состава ила и подстилающей почвы. Химический состав ила и почвы (в % на прокаленное вещество) у убежища Средний Двор в Рыбинском водохранилище (по: Драчев, 1971) приведен ниже.

	Si	Al	Fe	Ti	Mn	P	S	Ca	Mg	Na	K
Ил	38.40	5.55	2.37	0.37	0.07	0.13	0.41	0.93	0.50	0.44	1.30
Почва	36.90	6.36	3.28	0.41	0.05	0.13	0.25	0.67	0.78	0.42	1.30

Ограниченность фактического материала затрудняет сравнение водохранилищ по химическому составу донных отложений. Исходя из приведенных данных (табл. 22), можно считать, что песчанистые серые илы этих водоемов по химическому составу более близки к подстилающим почвам, чем между собой.

Отличительная черта состава песчанистого серого ила в Рыбинском водохранилище — пониженное по сравнению с Иваньковским содержание щелочных и щелочноземельных металлов, что объясняется, по-видимому, меньшей загрязненностью его вод. Содержание железа и марганца в иле Рыбинского водохранилища оказалось ниже, чем в Иваньковском водохранилище и в подстилающей почве. Можно полагать, что это связано с более высокой миграционной активностью этих элементов в водах Рыбинского водохранилища, обусловленной повышенным в сравнении с другими верхневолжскими водохранилищами содержанием органического вещества (Рыбинское водохранилище..., 1972). Для проверки этих предположений необходим обширный фактический материал по составу различных типов донных отложений водохранилищ. Отмечается сходство отложений по содержанию фосфора и серы. При этом содержание серы в илах обоих водохранилищ больше,чем в подстилающих почвах. Возможно, это определяется процессами сульфатредукции и регенерации сульфатов в илах водохранилищ (Соколова, Сорокин, 1957).

Основные источники взвешенного органического вещества в водохранилищах — остатки растительных и животных организмов, населяющих водоем, высшая водная растительность, продукты размыва торфяных сплавин и переработки почвенного слоя и наземной растительности, затопленной при заполнении водоема, органическое вещество речных наносов. Органические частицы вследствие малого удельного веса рассеиваются по всему водохранилищу. Местом их преимущественной аккумуляции служат

участки с малой гидродинамической активностью — глубины, превышающие глубину размывающего действия волнения, закрытые мелководья, заостровные пространства, где отложившиеся органические частицы не подвергаются в дальнейшем взмучиванию.

Таблица 23

Содержание органического вещества в грунтах Иваньковского водохранилища

№ станции	Грунт	Глубина при НПУ, м	Сумма фракций <0.01, мм	П. п. п.	Общее органическое вещество по мокрому сжиганию, % от сухого веса	Общий азот, % от сухого веса	C/N
	Волжский плёс						
7	Крупный песок . . .	7.4	0.2	0.7	0.26	0.006	24.7
12	Песчанистый серый ил	6.3	22.2	16.7	11.95	0.38	18.7
67	То же	10.3	15.2	6.6	4.08	0.14	16.9
25	Отложения из макрофитов	2.2	34.2	55.4	56.60	2.04	16.1
20	Почва супесчаная серая	0.6	14.2	8.2	4.50	0.20	13.0
45	Почва песчаная серая	3.2	9.2	5.4	2.83	—	—
	Иваньковский плёс						
1	Песчанистый серый ил	5.3	26.0	21.0	15.49	0.72	12.5
72	Песчанистый темно-серый ил	11.4	28.4	22.4	17.30	0.77	13.0
78	Песчанистый серый ил	15.5	13.0	9.0	4.01	0.17	13.6
95	То же	6.1	24.6	10.4	5.75	0.28	11.9
124	» »	18.2	24.4	13.3	7.44	0.33	12.8
138	» »	4.2	11.6	3.9	3.14	—	—
147	Серый ил	9.1	30.6	12.9	8.25	0.39	12.3
	Шошинский плёс						
184	Песок илистый	1.8	9.6	3.7	2.14	0.13	9.5
169	Песчанистый серый ил	3.4	18.8	7.3	4.61	0.20	13.4
175	То же	11.4	24.0	6.2	4.21	0.32	7.6
157	Отложения из макрофитов	2.2	33.8	65.2	66.07	2.39	16.0
187	Почва супесчаная светло-серая	1.0	24.8	7.4	5.81	0.35	9.6

За основной показатель содержания органического вещества в грунтах принималась потеря при прокаливании. В ряде случаев проводилось параллельное определение общего органического вещества по мокрому сжиганию. Содержание органического вещества в различных типах отложений Иваньковского водохранилища колеблется от 0.7 до 65.2% (табл. 23). Наиболее богаты органи-

ческим веществом отложения из макрофитов. Для остальных грунтов водохранилища характерно увеличение содержания органического вещества с уменьшением дисперсности грунта, т. е. наблюдается та же закономерность, что и на крупных континентальных водоемах (Семенович, 1966, 1973). Указанная зако-

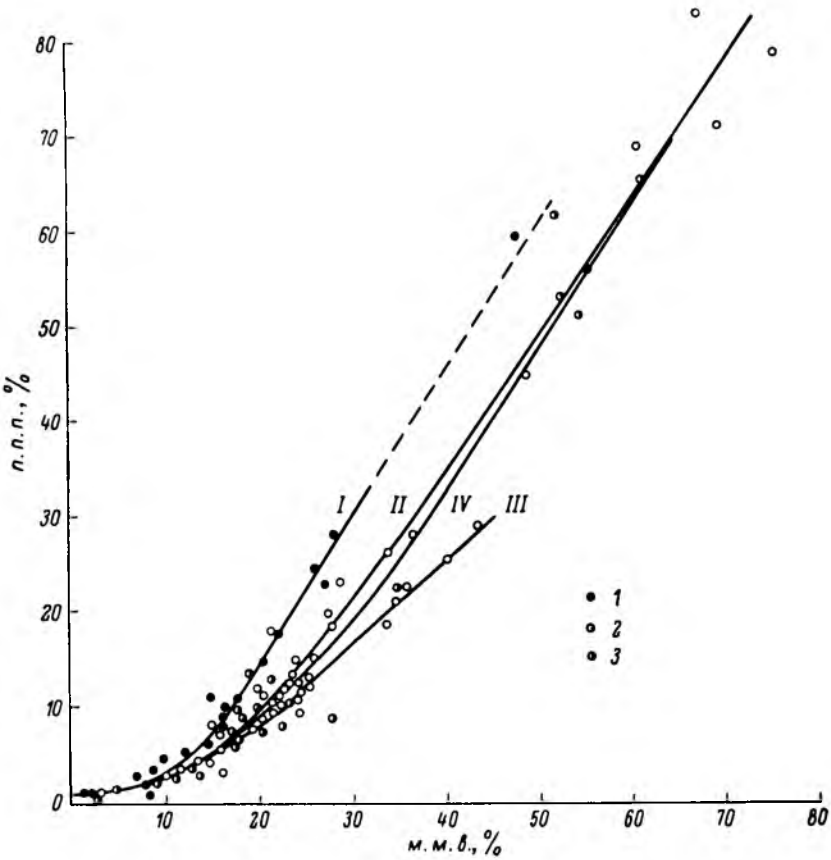


Рис. 31. Кривые связи между потерей в весе при прокаливании (п. п. п.) и максимальной молекулярной влагоемкостью (м. м. в.) для грунтов Иваньковского водохранилища.

I — Волжский плёс, *II* — первая кривая Иваньковского плёса, *III* — вторая кривая Иваньковского плёса, *IV* — Шошинский плёс. Донные отложения плёсов: *1* — Волжского, *2* — Иваньковского, *3* — Шошинского.

номерность объясняется седиментацией органических и тонких минеральных частиц на одних и тех же участках водоема в силу их одинаково малой гидравлической крупности.

Зависимость содержания органического вещества от механического состава грунта подтверждается кривыми связи между потерей при прокаливании и максимальной молекулярной влагоем-

костью, которая, как и гигроскопическая влажность, может служить интегральной характеристикой механического состава грунта (рис. 31). Для различных участков Иваньковского водохранилища получено семейство однотипных кривых связи между потерей при прокаливании и максимальной молекулярной влагоемкостью. Это означает, что при одном и том же механическом составе отложений содержание органического вещества на разных участках водоема может быть различно и объясняется разной обеспеченностью отдельных участков органическим материалом, принимающим участие в формировании отложений. Наибольшее увеличение содержания органического вещества при увеличении степени дисперсности отложений наблюдается в Волжском плёсе водохранилища. В этот плёс органические взвеси поступают главным образом с речным стоком, а седиментация их происходит в основном в меженные периоды, когда стоковые течения в плёсе малы. В это время содержание органического вещества в речных наносах, поступающих в водохранилище, достигает 25—40% (Зиминова, Григорьева, 1974). Наименьшее содержание органики при равной дисперсности отложений отмечается на участках Иваньковского плёса, расположенных вблизи размываемых подводных склонов и берегов (рис. 31, *III*). В этих условиях происходит интенсивное обогащение отложений минеральными частицами.

Содержание общего азота в грунтах Иваньковского водохранилища колеблется от нескольких тысячных процента в песке до 2.4% — в отложениях из макрофитов (табл. 23). Отношение углерода к азоту, характеризующее способность органического вещества разлагаться до более простых форм и дающее некоторое представление о его трофической ценности и генезисе, в донных отложениях водохранилища равно 8—25. Отмечается тенденция повышения C/N во вторичных отложениях Волжского плёса, органическое вещество которых имеет в основном аллохтонное происхождение. В остальных плёсах водохранилища, где пополнение запасов органики во вторичных отложениях идет также и за счет автохтонного материала (продукты распада прибрежно-водной растительности и фитопланктона), отношение C/N в большинстве случаев находится в пределах 12—16.

В серых илах Угличского водохранилища органического вещества меньше, чем в таковых Иваньковского (табл. 18). В серых илах на пойме потеря в весе при прокаливании составляет 4.3—9.6%, на русло — 3.9—21%. Меньшее количество органического вещества во вторичных отложениях Угличского водохранилища может быть связано с относительной бедностью его макрофитами. Продукция органического вещества прибрежно-водной растительности Угличского водохранилища составляет 15.4 г/м^2 при общей площади, занятой макрофитами, 5.3% от площади зеркала водоема (Экзерцева, 1961). Для Иваньковского водохранилища эта величина равна 75.8 г/м^2 при зарастаемости 16.7% (Экзерцев, 1958). Продукция органического вещества прибрежно-водной ра-

Таблица 24

Содержание органического вещества в грунтах Рыбинского водохранилища

Грунт	Глубина при НПУ, м	Максимальная молекулярная влагоемкость, %	П. п. п., %	Общее органическое вещество по мокрому сжиганию, % от сухого веса	Общий азот, % от сухого веса	C/N	Гидролиз 5%-й H_2SO_4 по Тюрину на легкоусвояемые C и N: легкоусвояемое органическое вещество, % от общего органического вещества	легкоусвояемый N, % от общего N	легкоусвояемый N, % от общего C	Гемицеллюлоза и сахара, % от общего органического вещества	Клетчатка, % от общего органического вещества	Лигнино-гумусовый комплекс: % от сухого веса	% от общего органического вещества
Первичный грунт													
Супесчаная почва	7.8	21.0	7.7	5.6	0.25	12	13.4	23.0	3.47	10.2	3.75	4.7	85.1
Торф	3.6	54.5	80.0	82.7	0.61	75.0	1.12	9.4	0.12	0.89	0.33	78.0	95.2
Вторичный грунт													
Пылеватый песок	4.4	5.0	0.5	0.3	0.0046	34.2	23.3	9.8	2.35	—	—	—	—
Серый песчанистый ил	13.0	18.8	7.1	5.9	0.18	18.8	16.1	52.0	2.2	5.8	1.5	3.9	67.0
Серый ил	7.0	24.0	12.6	10.5	0.36	15.5	13.9	27.4	1.75	4.8	2.2	8.3	83.7
То же	13.0	24.9	12.6	10.5	0.32	18.4	10.6	19.0	1.01	4.3	1.6	7.85	79.0
Переходный ил	17.1	36.9	30.6	30.3	0.76	22.3	6.65	12.1	0.54	1.35	2.05	21.4	70.05
Торфянистый ил	12.0	61.0	62.4	65.1	1.09	33.5	3.9	12.8	0.38	1.94	—	50.8	77.9

Примечание. Сведения о составе органического вещества грунтов заимствованы из работы Ю. И. Сорокина (1959).

стительности в Угличском водохранилище в 5 раз меньше, чем в Иваньковском в пересчете на площадь водоема, и в 7 раз меньше в пересчете на объем. Следует, однако, отметить, что в последнее время вследствие эндогенных сукцессий в Угличском водохранилище отмечается увеличение продуктивности макрофитов при сохранении той же площади зарослей (Экзерцев, 1973).

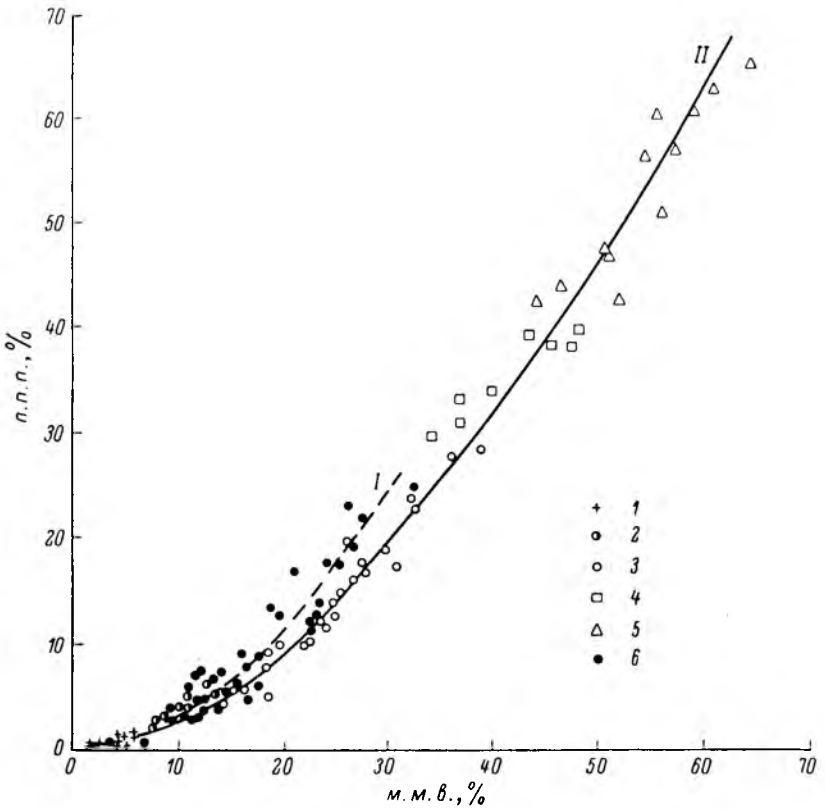


Рис. 32. Кривые связи между потерей в весе при прокаливании (п. п. п.) и максимальной молекулярной влагоемкостью (м. м. в.) для грунтов Рыбинского водохранилища.

I — первичный грунт, *II* — вторичный грунт. *1* — песок, *2* — илистый песок, *3* — песчанистый и серый ил, *4* — переходный ил, *5* — торфянистый ил, *6* — песчаная и супесчаная почвы.

Возможно, это повлечет за собой некоторое увеличение содержания органического вещества в отложениях.

Содержание органического вещества в первичных грунтах Рыбинского водохранилища (песчаных и супесчаных почвах) не превышает 25%, у торфа — более 70% (табл. 24). Потеря в весе при прокаливании вторичных грунтов изменяется от 0.5% у песков до 70% — у торфянистого ила, у песчанистых серых и серых илов

она составляет 10—30%. Вторичные грунты Рыбинского водохранилища по сравнению с грунтами других верхневолжских водохранилищ содержат большее количество органического вещества. Отчетливо прослеживается, как и в Иваньковском водохранилище, связь между содержанием органического вещества и механическим составом грунта (рис. 32). Первичные грунты при равных со вторичными отложениями величинах максимальной молекулярной влагоемкости имеют более высокие значения потери при прокаливании. Это может быть обусловлено более высоким содержанием в первичных грунтах карбонатов и кристаллизационной воды.

Таблица 25

Содержание общего азота в органическом веществе донных отложений Рыбинского водохранилища (по: Трифонова, 1974)

Грунт	N, % от органического вещества	Грунт	N, % от органического вещества
Песок	2.8	Серый ил	2.3
Илистый песок . . .	2.4	Переходный ил . .	2.1
Песчанистый серый ил	2.3	Торфянистый ил . .	1.9
		Торф	1.4

Содержание общего азота в донных отложениях водохранилища, по определениям Н. А. Трифоновой (1974), составляет 0.02—0.09% сухого веса в песке, 0.35—0.72 — в сером иле и 0.67—1.05% — в торфянистом иле. Содержание азота в органическом веществе для большинства донных отложений Рыбинского водохранилища не превышает 2.5%, а для торфянистого ила составляет в среднем 1.9% (табл. 25).

Приведенные данные (табл. 25) свидетельствуют о том, что органическое вещество донных отложений Рыбинского водохранилища беднее азотом в сравнении с Иваньковским, где азот составляет в среднем 3.6% от органического вещества. Расчетами Н. А. Трифоновой (1974) показано, что около 35% азота, оседающего ежегодно на дно, вновь поступает в водную толщу в результате процессов обмена между водой и донными отложениями.

Состав органического вещества отдельных типов грунта, исследованный Ю. И. Сорокиным (1958а), имеет существенные различия (табл. 24). Торфянистые илы с высоким содержанием органического вещества и большей молекулярной влагоемкостью характеризуются отношением C/N, равным 33—39. Это свидетельствует о большой перегруженности их трудноминерализуемыми лигнино-гумусовыми веществами, составляющими 35—50% веса ила и около 80% от общего органического вещества. В торфе, слу-

жащем исходным материалом для формирования торфянистых илов, отношение C/N равно 75 при содержании органического вещества 82%.

Серые илы наиболее продуктивны в отношении как бентоса, так и микрофлоры и характеризуются наименьшими значениями отношения C/N (6—19), а также минимальным содержанием лигнино-гумуса (3—8%). В незаиленных плотных почвах содержание органического вещества и отношение C/N близки к величинам, найденным для серых илов, однако продуктивность последних во много раз больше, чем у плотных грунтов. Анализ состава органического вещества грунтов показал, что в торфянистых илах открытых частей водохранилища легкоусвояемое органическое вещество составляет всего 4—5% от общего, в серых илах — 10—20%. Отношение легкоусвояемого азота к общему углероду в серых илах почти в 10 раз выше, чем в торфянистых. Процент легкоусвояемого азота от общего азота торфянистых илов равен 12—16, а в серых — 20—40%. Органическое вещество серых илов отличается повышенным содержанием гемицеллюлоз и сахаров (до 6—10%). Незаиленные почвы по характеристике органического вещества мало отличаются от серых илов, однако структура плотных почв такова, что затрудняет обмен между почвой и водой и отрицательно сказывается на развитии микрофлоры в их толще. Анализ состава органического вещества грунтов водохранилища, а также данные микробиологических анализов позволили Ю. И. Сорокину (1958а) сделать вывод, что избыточное накопление органического вещества во вторичных отложениях водохранилища ведет к торможению биологических процессов в них. Наименьшая биомасса бактерий и бентоса наблюдается в торфянистых илах. Высокое содержание органического вещества в отложениях определяет их высокую гидрофильность. Большие значения максимальной молекулярной влагоемкости обусловлены особыми коллоидными свойствами гуминовых веществ, которые способствуют пептизации илов, их разбуханию. Обмен между водой и илом затрудняется, создаются анаэробные условия и повышенная кислотность. Такие физико-химические условия угнетают деятельность микрофлоры и способствуют консервации органического вещества в иле.

За период существования водохранилища интенсивность поступления грунтообразующего материала из различных источников менялась, что повлекло за собой изменения в составе илистых отложений, в частности в количестве органического вещества. Об этом свидетельствуют послойные определения потери в весе при прокаливании, которые производились по всей длине колонки через 5 см в 75 колонках грунта, отобранных в 1962—1965 гг. Для удобства сравнения вычислены индексы изменения количества органического вещества, представляющие частное от деления величины потери при прокаливании в верхнем 5-сантиметровом слое отложений на среднеарифметическое ее значение для лежа-

щих ниже слоев. Индекс меньше единицы указывает на уменьшение количества органического вещества в верхнем слое грунта, при индексе больше единицы в этом слое содержится больше органического вещества, чем в нижележащих слоях. Индексы вычислены для наиболее характерных грунтовых станций по всему водохранилищу (рис. 33, табл. 26).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в Волжском, Моложском и в Шекснинском плёсах происходит обогащение ор-

Таблица 26

Индексы количества органического вещества и потеря в весе при прокаливании (% от сухого веса) в верхнем слое грунта и средняя в лежащих ниже слоях для илистых отложений Рыбинского водохранилища

№ станции	Глубина при НПУ, м	П. п. п.		Индекс	№ станции	Глубина при НПУ, м	П. п. п.		Индекс
		в слое 0—5 см	средняя ниже 5 см				в слое 0—5 см	средняя ниже 5 см	
1	13.8	15.5	13.5	1.15	17	10.3	15.5	16.6	0.94
2	8.5	19.0	12.8	1.48	18	11.9	38.0	41.3	0.92
3	13.4	21.3	18.0	1.18	19	14.7	35.0	40.0	0.88
4	15.9	28.9	26.4	1.10	20	12.1	13.6	17.1	0.80
5	10.1	40.6	42.5	0.96	21	12.6	22.4	28.4	0.79
6	10.4	26.2	45.3	0.58	22	18.8	40.0	45.5	0.88
7	10.8	42.5	48.5	0.88	23	5.7	40.4	48.4	0.84
8	9.8	19.2	27.1	0.71	24	25.6	31.3	39.9	0.78
9	12.9	38.3	47.5	0.81	25	18.6	22.6	24.5	0.92
10	12.9	7.6	3.3	2.30	26	13.9	24.0	32.2	0.75
11	9.8	22.4	19.8	1.13	27	8.3	19.4	34.0	0.57
12	18.7	44.5	45.0	0.99	28	19.2	27.1	29.8	0.91
13	7.0	15.7	27.9	0.56	29	7.2	22.1	35.2	0.63
14	10.2	29.6	41.5	0.72	30	7.0	13.0	12.0	1.08
15	16.6	41.1	42.0	0.98	31	6.9	12.2	13.2	1.08
16	13.1	32.1	36.2	0.89					

ганическим веществом верхнего слоя отложений. В Главном плёсе верхний слой илистых отложений содержит меньшее количество органического вещества, чем нижележащие слои. К аналогичному заключению пришла Н. А. Трифонова (1974) на основании сопоставления результатов послойных определений содержания общего азота в донных отложениях. Вместе с тем этот же автор отмечает, что содержание азота в органическом веществе верхних слоев больше или равно таковому в нижних, но не меньше. Более высокое содержание азота в органическом веществе отложений Главного плёса, так же как и более узкое значение отношения C/N, указывает на то, что изменения в составе органического вещества донных отложений, накапливающихся в последнее время, происходят в результате сокращения поступления торфянистых частиц. В речных плёсах при относительном увеличении содержания

в верхнем слое отложений азота и органического вещества состав последнего заметно не изменяется. Общее увеличение органического вещества и азота происходит за счет относительного повышения доли органических частиц при сокращении поступления

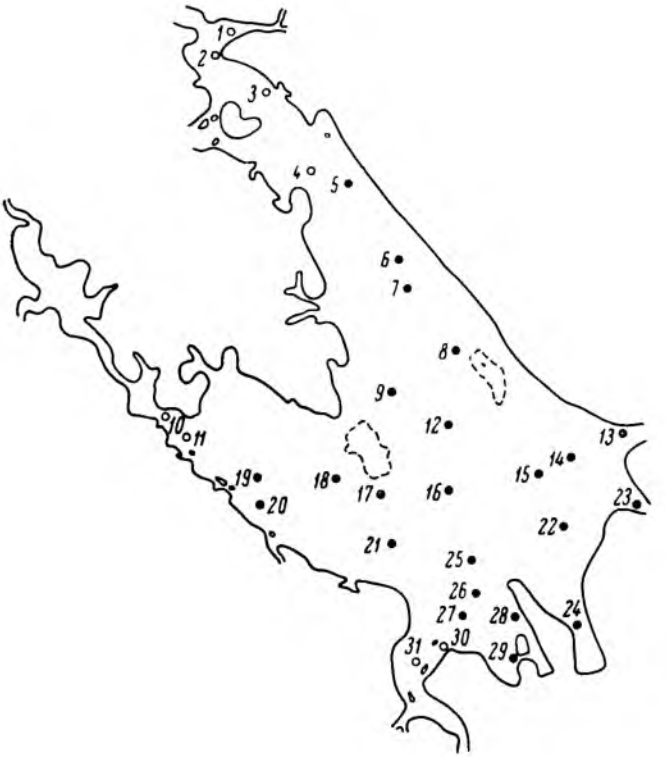


Рис. 33. Расположение грунтовых станций (1—31) на Рыбинском водохранилище.

Черные кружки — станции с индексом меньше единицы, *светлые кружки* — с индексом больше единицы.

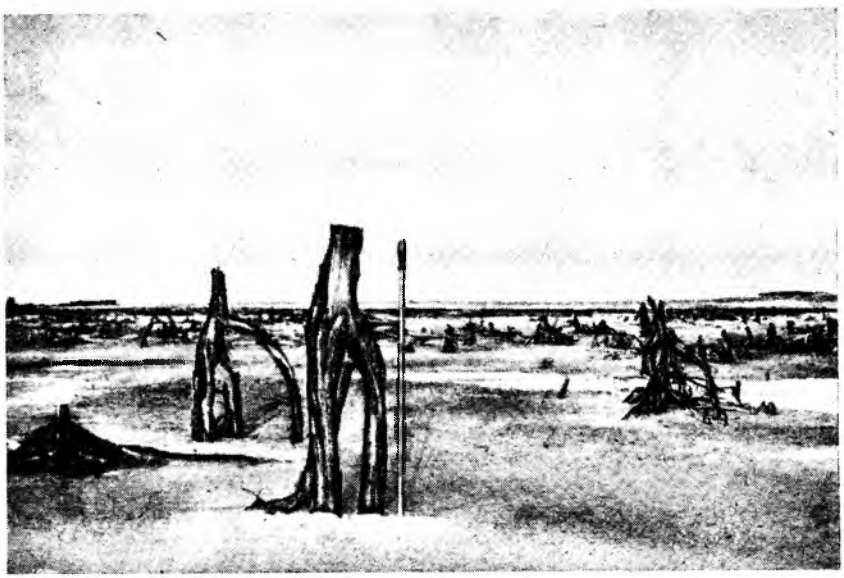
минеральных взвесей. Отмеченные изменения в составе донных отложений определяются комплексом причин, анализ которых приводится ниже (см. главу VII).

Объемный вес

Решение ряда вопросов, связанных прежде всего с заилением водоемов, требует знания одного из важнейших физических свойств донных отложений — их объемного веса. Объемный вес донных отложений и его изменение тесно связаны с содержанием органического вещества. Уменьшение органического вещества в грунте ведет к увеличению объемного веса.

Данные по объемному весу донных отложений различных водохранилищ относятся главным образом к отложениям со сравнительно низким содержанием органического вещества (Иванов, 1962; Heineman, 1962; Яковлева, 1965; Петухова, 1966, и др.).

В верхневолжских водохранилищах, особенно в Рыбинском, преобладающие типы вторичных отложений характеризуются высоким содержанием органического вещества, поэтому илистые от-



Корни сосен, обнажившиеся в результате размыва мелководья на западном берегу расширенной части Волжского плёса Рыбинского водохранилища.

ложения этих водоемов имеют значительно меньший объемный вес (Зиминова, Курдин, 1971б).

Остановимся подробнее на характеристике объемного веса донных отложений Рыбинского водохранилища. Величины объемного веса однотипных отложений Иваньковского и Угличского водохранилищ те же, что и Рыбинского. Для основных типов отложений этого водоема было проведено по нескольку определений объемного веса (общее число определений — 73) и подсчитана его средняя величина (табл. 27). Статистическая обработка подтвердила наличие реального различия между полученными средними значениями объемного веса всех грунтов, за исключением торфянистого и переходного ила. На основе имеющегося материала нельзя говорить о существовании различия между средними значениями объемного веса этих типов грунта, поэтому при расчетах целесообразно принимать средний объемный вес совокупности торфянистый ил + переходный ил, равный 0.15 г/см^3.

Сравнение полученных нами величин с объемными весами отложений различного механического состава, рекомендуемыми Г. А. Петуховой (1966), показало, что средние значения объемного веса грунтов при малом содержании органического вещества (<10%) хорошо совпадают со значениями объемных весов отложений сходного механического состава, приведенными в указанной работе. Объемный вес илов Рыбинского водохранилища значительно меньше величин, указанных Г. А. Петуховой. Минимальный воздушно-сухой объемный вес топкого минерального ила рекомендуется ею принимать равным 0.7—0.8 г/см³, а в Рыбинском водохранилище объемный вес ила не превышает 0.35 г/см³.

Как следует из приведенных данных (табл. 27), уменьшению объемного веса сопутствует увеличение гигроскопической влажности и содержания органического вещества.

Два эти показателя являются основными факторами, определяющими величину объемного веса. Коэффициент множественной корреляции между объемным весом абсолютно сухого грунта и этими факторами равен 0.897. Гигроскопическая влажность обычно рассматривается как интегральная характеристика механического состава грунта (Иванов, 1962). В донных отложениях Рыбинского водохранилища

Таблица 27

Объемный вес, потеря в весе при прокаливании и гигроскопическая влажность грунтов Рыбинского водохранилища

Грунт	П. п. п., %	Гигроскопическая влажность, %	Объемный вес					
			натуральной влажности, г/см³		воздушно-сухой, г/см³		абсолютно сухой, г/см³	
			среднее значение	пределы колебаний	среднее значение	пределы колебаний	среднее значение	пределы колебаний
Средний песок	<3	0.12—0.26	2.07	2.02—2.12	1.69	1.65—1.72	1.69	1.65—1.72
Мелкий песок	<3	0.31—0.56	1.97	1.94—2.08	1.53	1.36—1.69	1.53	1.36—1.69
Илистый песок	3—20	0.65—1.96	1.62	1.25—1.85	1.02	0.56—1.35	1.01	0.55—1.33
Песчанистый серый ил	10—20	3.32—4.42	1.19	1.15—1.25	0.35	0.30—0.39	0.34	0.29—0.38
Серый ил	20—30	2.74—5.41	1.14	1.06—1.22	0.31	0.34—0.38	0.29	0.18—0.37
Переходный ил	30—40	4.00—8.61	1.08	1.02—1.15	0.20	0.14—0.27	0.19	0.12—0.25
Торфянистый ил	40—70	5.85—11.80	1.05	1.00—1.20	0.15	0.10—0.22	0.14	0.09—0.21
Торф	70	8.87—13.00	1.30	1.13—1.57	0.09	0.08—0.10	0.08	0.07—0.09

величина гигроскопической влажности зависит не только от механического состава, но в значительной степени и от содержания органического вещества, определяющего качество связывающей воду поверхности. Зависимость между гигроскопической влажностью и содержанием органического вещества имеет характер прямой коррелятивной связи с высоким коэффициентом корреляции (0.894). Высокая коррелятивность этих признаков в условиях Рыбинского водохранилища не может быть объяснена

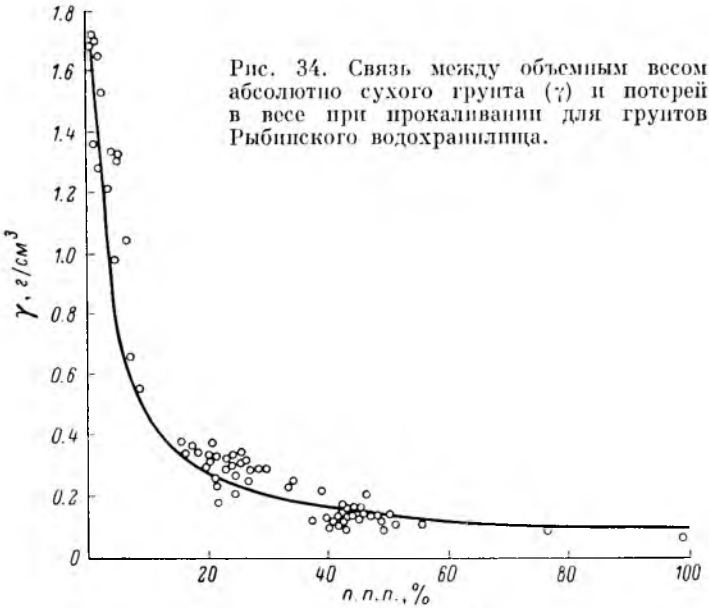


Рис. 34. Связь между объемным весом абсолютно сухого грунта (γ) и потерей в весе при прокаливании для грунтов Рыбинского водохранилища.

только изменениями в механическом составе отложений при изменениях содержания органического вещества в связи с одинаковой гидравлической крупностью органических частиц и тонких минеральных взвесей, как это было показано Л. В. Яковлевой (1965) для малых водоемов центрально-черноземных областей. Это обстоятельство, конечно, оказывает влияние на тесноту связи. Но следует также учитывать, что в илистых отложениях Рыбинского водохранилища при сходном механическом составе содержание органического вещества сильно варьирует, так как формирование грунтового комплекса этого водоема определялось не только гидродинамической активностью водной массы на разных участках, но и размещением источников грунтообразующего материала, а также их удаленностью от района седиментации.

Таким образом, зависимость абсолютно сухого объемного веса от каждого из двух указанных факторов в отдельности учитывает влияние второго фактора. Зависимости имеют вид кривых гиперболического типа, причем наиболее тесной оказалась связь абсо-

лютно сухого объемного веса грунта с содержанием органического вещества (рис. 34). Аналитически она может быть выражена уравнением: $\gamma = 2.34$ (п. п. п.)$^{-0.71}$, где γ — абсолютно сухой объемный вес, г/см^3; п. п. п. — потеря при прокаливании, %.

При расчетах заиления обычно устанавливаются объемы различных типов отложений, характеризующихся определенными

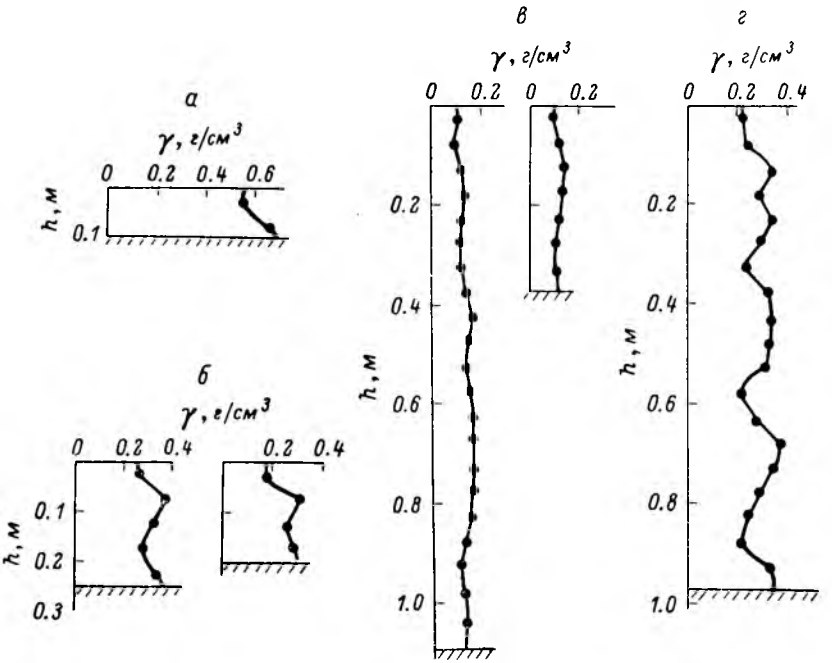


Рис. 35. Вертикальное распределение объемного веса вторичных отложений (γ) Рыбинского водохранилища.

а — илистый песок, *б* — песчанистый серый и серый ил, *в* — торфянистый ил, *г* — серый и переходный ил.

пределами содержания органического вещества, поэтому с достаточной для практики точностью могут быть использованы данные табл. 27.

Кроме механического состава и содержания органических веществ, еще одним важным фактором, влияющим на величину объемного веса, считается высота слоя отложений. Обычно отмечается увеличение объемного веса отложений с увеличением высоты их слоя (Яковлева, 1960; Heinemann, 1962).

При изучении объемного веса донных отложений Рыбинского водохранилища такой закономерности установить не удалось. Наблюдающееся иногда увеличение объемного веса в нижних горизонтах (рис. 35, *а*), а также более или менее значительные его колебания по вертикали (рис. 35, *б—г*) вызваны, как показали оп-

ределения потери в весе при прокаливании, не уплотнением отложений, а различиями в составе отдельных слоев.

Годичная слоистость в донных отложениях Рыбинского водохранилища отсутствует (Зиминова, Курдин, 1968а). Это обусловлено тем, что бо́льшая часть дна водоема подвергается волновому воздействию, вызывающему значительную трансседиментацию отложений, которая нарушает хронологическую последовательность в накоплении частиц грунта. Другая причина изменения в составе отложений во времени и, следовательно, неоднородности колонки грунта по вертикали — изменения в интенсивности поступления грунтообразующего материала из различных источников за период существования водохранилища (Курдин, Зиминова, 1968а). В результате совместного действия указанных факторов происходят изменения в составе колонки отложений в пределах одного типа грунта, а часто и неоднократная смена одного типа грунта другим. Это и нашло отражение в распределении объемного веса по вертикали. По-видимому, при существующих мощностях грунтов Рыбинского водохранилища, богатых органическим веществом и отличающихся большой величиной натуральной влажности (до 80%), фактор уплотнения играет менее важную роль, чем их состав. Влияние уплотнения грунта в водоеме на его объемный вес затушевывается зависимостью последнего от состава грунта.

Таким образом, средний абсолютно сухой объемный вес преобладающих типов грунтов Рыбинского водохранилища колеблется в пределах 0.08—1.69 г/см^3, воздушно-сухой объемный вес составляет 0.09—1.69 г/см^3, объемный вес натуральной влажности равен 1.05—2.07 г/см^3. Из вторичных отложений минимальным объемным весом характеризуются илы, богатые органическим веществом. Содержание органического вещества в донных отложениях водохранилища и механический состав их — основные факторы, влияющие на величину объемного веса.

ГЛАВА VII

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Накопление донных отложений

Процесс накопления вторичных донных отложений в водохранилищах — основной вид накопления вещества в водоемах, находящихся на ранних стадиях развития (Россолимо, 1964). Он характеризуется общей массой вещества, аккумулируемого в водоеме в единицу времени. При исследовании осадконакопления в прудах и водохранилищах эта величина определяется обычно

на основе батиметрических съемок, проводимых через определенный временной интервал. Такой подход дает представление о суммарном изменении объема чаши водоема под воздействием ряда факторов, но не отражает существа процесса накопления вторичных отложений и формирования качественно нового дна, обладающего иными по сравнению с естественными водоемами морфологическими и физико-химическими свойствами.

Для верхневолжских водохранилищ, в которых бо́льшая часть грунтообразующего вещества имеет автохтонный характер и уменьшение объема чаши в одной части водоема часто происходит при одновременном увеличении его в другой (например, размыв дна, торфяных сплавин), такой способ определения объема вторичных отложений неприемлем. Кроме того, как показали новейшие исследования (Лилиенберг и др., 1972), скорости современных движений земной коры в районе верхневолжских водохранилищ соизмеримы со среднегодовыми темпами осадконакопления, что также может привести к погрешностям при определении объема отложений на основе батиметрических съемок. Величина осадконакопления определялась нами во всех трех водохранилищах по результатам непосредственного зондирования и измерения высоты слоя вторичных отложений. (Методика определения изложена в главе II). Рассмотрим особенности распределения мощности отложений в каждом водохранилище, связанные с различиями в морфологии и гидрологическом режиме водоемов и их отдельных участков.

С учетом особенностей морфометрии и гидрологического режима Иваньковское водохранилище делится на 4 участка (рис. 1). Средняя высота слоя отложений в пределах каждого из них по интервалам глубин, а также объем и вес отложений приведены в табл. 28. Как видно из приведенных данных, процесс накопления донных отложений на отдельных участках идет неодинаково. В стрежневой части верхнего участка накопления отложений почти не происходит. Только на глубинах 3—6 м, где скорости стоковых течений ослабевают и волнение не проникает до дна, высота слоя отложений достигает 5 см. При уменьшении глубины мощность отложений снова уменьшается.

На всех остальных участках водохранилища наблюдается накопление донных отложений, хотя интенсивность его различна. Обычно с увеличением глубины мощность отложений увеличивается. Максимальное осадконакопление происходит в глубоководных частях приплотинного Иваньковского плёса. Здесь высота отложений достигает 60 см. Иваньковский плёс вместе с Шошинским являются основными аккумуляторами вещества как в весовом, так и в объемном выражении. Даже на мелководных участках этих плёсов, несмотря на то что часть из них подвержена действию волнения и имеет очень низкие темпы аккумуляции, высота слоя отложений на соответствующих глубинах превышает таковую на других участках. Это объясняется тем, что приводи-

Таблица 28

Накопление вторичных донных отложений в Иваньковском водохранилище за 1937—1968 гг.

Участок	Глубина, м	Тип отложений	Высота слоя, см	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т	Среднее годовое накопление, см
I (ГЭС—р. Созь)	0—3	Илистый песок	3.5	0.001738	1911.8	0.11
	3—6	Песчанистый серый ил . . .	5.3	0.002142	1285.2	0.17
	6—9	Песчанистый серый и серый илы	11.0	0.002066	1053.7	0.34
	> 9	Песчанистый серый и серый илы	60.7	0.004953	2526.0	1.90
Сумма	—	—	—	0.010899	6776.7	—
II (реки Созь—Шоша)	0—3	Илистый песок	1.8	0.000306	336.6	0.06
	3—6	Илистый песок	3.0	0.000424	466.4	0.09
		Серый ил . . .	5 *	0.000068	20.4	0.16
	6—9	Песчанистый серый ил . . .	9.9	0.000370	222.0	0.31
		Серый ил . . .	37.7 *	0.000147	44.1	1.18
	> 9	Песчанистый серый и серый илы	12.8	0.001065	564.4	0.40
Сумма	—	—	—	0.002380	1653.9	—
III (Плёс—р. Шоша)	0—3	Илистый песок	3.6	0.003601	3601.0	0.11
	3—6	Песчанистый серый ил . . .	10.9	0.001858	1300.6	0.34
	> 6	Песчанистый серый ил . . .	28.1	0.001194	740.3	0.88
Сумма	—	—	—	0.006653	5641.9	—
IV (р. Шоша—Калинин)	0—3	Песок средний, мелкий, пылеватый	3.0	0.000726	943.8	0.09
	3—6	Песок средний, мелкий, пылеватый	5.2	0.000451	586.3	0.16
	6—9	—	—	—	—	—
	> 9	Серый ил . . .	0.4 **	0.000110	62.7	0.01
Сумма	—	—	—	0.001298	1592.8	—
Всего по водохранилищу . . .		—	—	0.021230	15665.3	—

* В плёсе р. Созн, в нижней части участка.

Таблица 29

Накопление донных отложений по интервалам глубин в Угличском водохранилище за 1940—1968 гг.

Участок, расстояние от плотины, км	Глубина, м	Тип отложений	Высота слоя, см	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т	Среднее годовое накопление, см
I 0—17	0—3	Песок мелкий	4.5	0.00024	389	0.16
	3—6	Песчанистый серый и серый илы	4.3	0.00028	171	0.15
	6—9	Серый ил	6.6	0.00074	251	0.23
	> 9	То же	23.6	0.00217	977	0.81
II 17—26	0—3	Песок мелкий и средний	1.5	0.00021	341	0.05
	3—6	Серый песчанистый ил	3.3	0.00028	166	0.11
	6—9	Серый ил	7.1	0.00052	184	0.24
	> 9	То же	27.4	0.00104	437	0.94
III 26—39	0—3	Песок мелкий и пылеватый	3.5	0.00020	244	0.12
	3—6	Песчанистый серый и серый илы	6.2	0.00052	313	0.21
	6—9	Серый ил	8.7	0.00048	167	0.30
	> 9	То же	29.8	0.00158	742	1.03
IV 39—57	0—3	Песок пылеватый и средний	2.2	0.00022	264	0.08
	3—6	Песчанистый серый и серый илы	2.7	0.00027	324	0.09
	6—9	То же	6.0	0.00021	252	0.21
	> 9	» »	20.0	0.00118	779	0.69
V 57—136	0—3	Песчанистый серый и серый илы	1.4	0.00101	607	0.05
	3—6	То же	2.6	0.00068	409	0.09
	6—9	Песок крупный, песчанистый серый ил . .	3.7	0.00049	586	0.13
	> 9	Песок мелкий и илистый средний	1.1	0.00018	267	0.04
		Всего		0.01250	7870	0.17

Таблица 30

Накопление донных отложений по интервалам глубин в Угличском водохранилище

Глубина, м	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т	Глубина, м	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т
0—3	0.00188	1845	6—9	0.00244	1440
3—6	0.00203	1383	> 9	0.00615	3202
Всего . .	—	—	—	0.01250	7870

мая (табл. 28) высота слоя отложений является средней для всего данного диапазона глубин, занятых как открытыми, так и закрытыми мелководьями. Закрытые же мелководья на рассматриваемых плёсах значительно преобладают над открытыми. Средняя высота годового слоя отложений колеблется в Иваньковском водохранилище на различных участках и глубинах от 0 до 1.9 см в год, составляя для водоема 0.2 см в год.

По аналогичной схеме определено накопление донных отложений в Угличском водохранилище; из приведенных данных по ин-

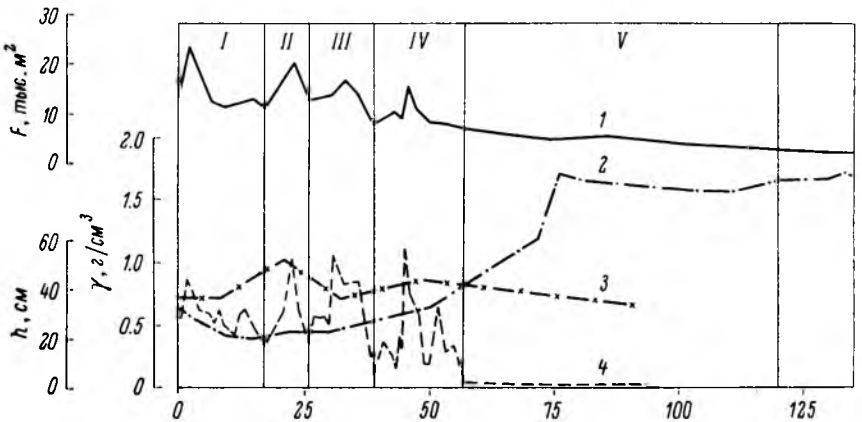


Рис. 36. Распределение мощности и сухого объемного веса отложений по длине Угличского водохранилища.

I—V — номера расчетных участков. *1* — площадь водного сечения (*F*), *2* — мощность вторичных грунтов по линии наибольших глубин (*h*), *3* — сухой объемный вес грунтов по линии наибольших глубин, *4* — средний сухой объемный вес отложений в интервале глубин 0—9 м (γ). *По оси абсцисс* — расстояние от плотины, км.

тервалам глубин в каждом из пяти выделенных участков (рис. 2) за время существования водохранилища (табл. 29) и для всего водоема (табл. 30) следует, что объем отложений и скорость осадконакопления увеличиваются с глубиной на всех участках водохранилища, за исключением пятого. На пятом участке скорости течения, превышающие критические, препятствуют образованию отложений в русловой части. Значительный же вес отложений в интервале глубин 0—3 м (табл. 30) определяется большим объемным весом преобладающих здесь песчанистых отложений.

Сопоставление изменений высоты слоя отложений и площади водного сечения по длине водохранилища (рис. 36) свидетельствует о наличии четкой зависимости между ними. Это обстоятельство было использовано для построения кривых $h = f(F)$, где h — средняя высота слоя отложений, F — площадь водного сечения (рис. 37). Расчет осадконакопления с использованием этих кривых позволил установить детальную картину распределения объ-

ема и веса отложений по длине водохранилища (табл. 31). Объем и вес вторичных отложений постепенно возрастают по направлению к плотине Угличской ГЭС, достигая наибольшего значения перед плотиной. На участке с большими окраинными плёсами осадконакопление возрастает, что также характерно для водохранилищ такого типа. Общая величина осадконакопления, рассчитанная с использованием кривых $h=f(F)$, весьма близка к приведенной в табл. 33. При балансовых расчетах величина осадконакопления принималась равной среднеарифметической из двух полученных ее значений — объем отложений 0.0123 км³, вес 8030 тыс. т.

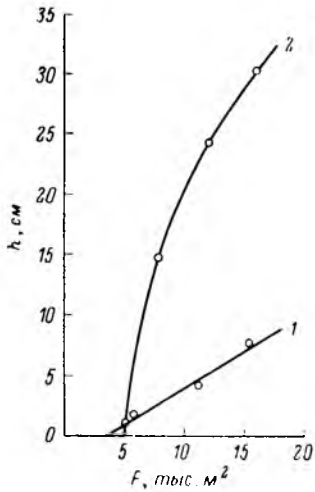


Рис. 37. Кривые связи мощности отложений (h) с площадью водного сечения (F) для Угличского водохранилища.

1 — для глубин < 9 м, 2 — для глубин > 9 м.

Высота среднегодового слоя отложений по отдельным участкам и глубинам Угличского водохранилища варьирует в пределах от 0 до 1.0 см в год при средней для всего водоема величине — 0.17 см в год. Средние темпы осадконакопления в Иваньковском и Угличском водохранилищах довольно близки при значительно большей дифференциации их по отдельным участкам в Иваньковском водохранилище.

Таблица 31

Распределение объема и веса донных отложений по длине Угличского водохранилища

Расстояние от плотины, км	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т		Расстояние от плотины, км	Объем отложений, км³	Вес отложений, тыс. т	
0—5	0.00178	1092		50—55	0.00039	299	
5—10	0.00070	410		55—60	0.00027	217	
10—15	0.00090	527		60—65	0.00012	95	
15—20	0.00118	845		65—70	0.00007	66	
20—25	0.00205	1618	(с плёсом	70—75	0.00020	171	С плёсом
25—30	0.00087	574	р. Пукши)	75—80	0.00014	115	р. Перли
30—35	0.00100	597		80—85	0.00007	70	
35—40	0.00065	407		85—90	0.00038	173	С плёсом
40—45	0.00044	293		90—95	0.00004	36	р. Медведицы
40—50	0.00085	585	(с плёсом р. Жабин)	Всего	0.01210	8190	

Большое разнообразие морфометрических особенностей и гидрологических условий в различных частях Рыбинского водохранилища обусловило и наиболее сложную картину в распределении мощности вторичных отложений. Для расчета осадконакопления в этом водоеме использованы материалы грунтовых съемок 1960, 1962 и 1965 гг. Осадконакопление определялось для 21 выделенного участка (рис. 3).

Таблица 32

Накопление донных отложений в Волжском плёсе Рыбинского водохранилища

Участок	Глубина при НПУ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Площадь, км²	Объем отложений, км³	Среднее годовое накопление, см
I-1	0—2	Серый ил	4.0	29.2	0.00118	0.16
	2—8	То же	6.5	12.0	0.00078	0.26
I-2	4—6	Песчанистый серый ил	4.6	29.8	0.00137	0.18
	6—8	Песчанистый серый и серый илы	13.4	29.5	0.00395	0.54
	8—10	Песчанистый серый ил	22.0 *	6.0	0.00132	0.88
	10—14	То же	38.0 *	9.0	0.00342	1.52
	> 14	» »	1.2	3.0	0.00004	0.05
		» »	35.0 *	4.8	0.00168	1.40
I-3	0—4	Песчанистый серый ил	2.1	18.0	0.00038	0.08
	4—6	Серый ил	38.0	17.0	0.00646	1.52
	6—8	Песчанистый серый ил	4.6	69.5	0.00320	0.18
	8—10	Серый и песчанистый серый илы	20.2	16.2	0.00327	0.81
	10—14	Серый и переходный илы	78.0	8.2	0.00640	3.12
	> 14	То же	48.0	8.1	0.00389	1.92
Всего	—	—	—	—	0.03734	—

* Ниже с. Коприн.

Рассмотрим закономерности накопления донных отложений в речных плёсах. Верхний участок Волжского плёса, обозначенный на схеме I-1, находится под непосредственным воздействием Угличской ГЭС и характеризуется наличием стоковых течений в период большей части года. Скорости стоковых течений здесь достаточны для поддержания взвесей, поступающих в плёс и образующихся в нем, во взвешенном состоянии. В русловой части этого участка на глубинах более 8 м в 1960 г. встречался местами лишь наилок серого ила высотой до 3 мм. Повторное обследование в 1966 г. показало, что за период 1960—1966 гг. накопления донных отложений в русловой части не произошло. Следовательно, тонкий слой наилка в русле имеет сезонное проис-

хождение, т. е. отлагается в периоды, когда стоковые течения минимальны, и смывается во время большой проточности.

Ниже впадения р. Юхоти, где заметно расширяется пойма и происходит увеличение различий в скоростях по ширине потока, на глубинах 2—8 м полного смыва отложений, представленных

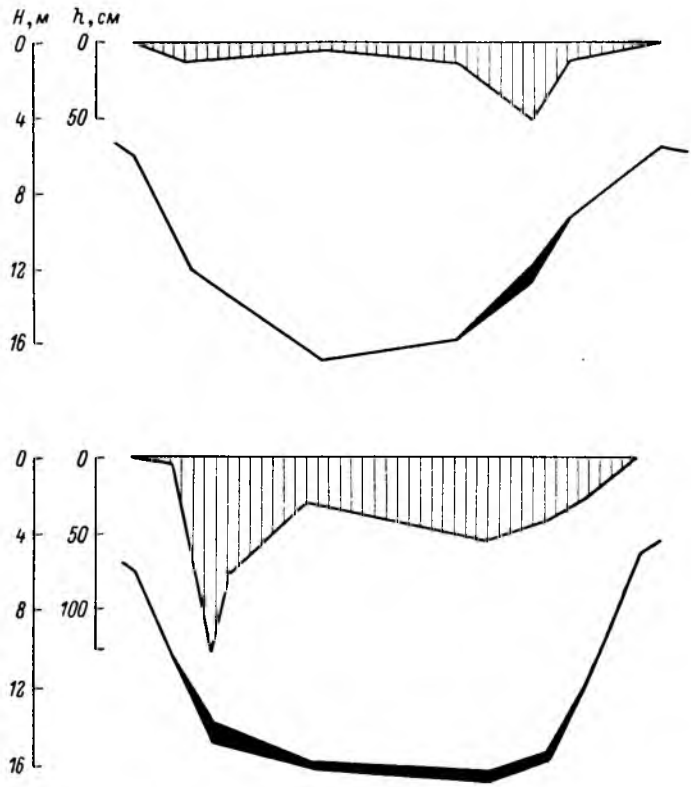


Рис. 38. Распределение мощности донных отложений по ширине Волжского плёса на участке I-2.

H — глубина при НПУ, м, *h* — высота слоя отложений, см.

здесь серым илом, не происходит — наблюдается постепенное их накопление. На малых глубинах (0—2 м) темпы накопления серого ила несколько меньше, поскольку здесь происходят взмучивание отложений под действием волнения и перемещение части образующихся взвесей на большие глубины. Темпы и объемы накопления донных отложений на участке представлены в табл. 32.

На участке I-2 (до Коприна) на глубинах, больших 14 м, наилок серого ила имеет высоту слоя около 1 см. Начиная от Коприна мощность отложений в стрежневой части русла возрастает в среднем до 35 см (с колебаниями от 4 до 83 см) с ясно

выраженной тенденцией увеличения высоты слоя вниз по длине русла. На склонах русла (глубины 10—14 м) мощность отложений, представленных песчанистым серым илом, несколько больше, чем в стрежневой части (табл. 32). Именно на склоне русла наблюдалась максимальная из измеренных на этом участке высота слоя, равная 127 см. На рис. 38 показано распределение мощности отложений по ширине участка на двух разрезах. В обоих случаях наибольшая высота слоя донных отложений наблюдается у подножия склона. Более интенсивное осадконакопление на склонах русла в речных плёсах определяется распределением скоростей в поперечном сечении потока. Мощность отложений на склонах русла значительно возрастает при наличии примыкающих к склону размываемых мелководий или участков дна с глубинами, допускающими частичную пересортировку вторичных отложений. Большие объемы грунта, высвобождавшиеся при размыве мелководий в период формирования их рельефа, сносились в глубоководные участки водоема. Попадая на склон русла, они оказывались в зоне, где скорости течения недостаточны для их транспортировки, а большие глубины препятствуют волновому взмыву. Все это приводило к интенсивной аккумуляции материала на склоне. При больших уклонах под действием силы тяжести возможно, по-видимому, постепенное сползание пластичных масс отложений к подошве склона. Аналогичный процесс наблюдается на некоторых озерах, где он является одной из причин неравномерной мощности донных отложений (Wieckowski, 1963).

Начиная с низкой поймы по мере уменьшения глубины мощность отложений постепенно уменьшается. На глубинах 4—6 м, как показали исследования размыва мелководий Волжского плёса (Курдин, 1965), находятся критические отметки, выше которых аккумуляция сменяется размывом. Поэтому на этих глубинах песчанистые илы уступают место илистым пескам и пескам. По мере расширения плёса и соответствующего увеличения зоны волнового воздействия на дно прослеживается уменьшение высоты слоя отложений в этом интервале глубин: на отрезке с. Сменцево—Коприно средняя высота слоя 6 см, от Коприна до нижней границы участка — 3.2 см.

Глубины 0—4 м на участке I-2 заняты почвами, размываемыми почвами и песками, являющимися в большинстве случаев результатом размыва песчанистых почв. Накопления донных отложений на этих глубинах, как правило, не происходит, за исключением некоторых изолированных от открытой части плёса мест (заливы, заостровные пространства).

Описанные закономерности распределения мощности отложений сохраняются в основном и на участке I-3. Отличительными чертами этого участка являются, во-первых, повышенные по сравнению с предыдущим темпы осадконакопления в русловых частях, что связано со значительным уменьшением проточности

при выходе волжского потока в расширенную часть водохранилища (Буторин, Литвинов, 1963). Во-вторых, в связи с расширением акватории, увеличением разгона волн и расширением зоны волнового воздействия накопление отложений здесь начинается с глубин более 6 м. Глубины 0—6 м подвержены размыву и заняты преимущественно песками. Исключение составляют защищенные от сильного волнения участки (Переборский залив, Югский залив, пролив между Юршинским и Каменниковским островами), где глубины 0—6 м заняты песчанистым серым и серым илом.

В Моложском плёсе стрежневая часть русла занята аллювиальными песками. Местами встречающийся тонкий слой песчанистого серого ила (менее 5 мм) сезонного происхождения. На склонах русла (на участке II-1 глубины 8—10 м, а на участке II-2, кроме того, и глубины 10—14 м) мощность отложений резко возрастает (табл. 33) по тем же причинам, что и в Волжском плёсе.

Мощность отложений на поймах, подверженных волновому воздействию, невелика. Размываемые почвы в плёсе встречаются сравнительно редко.

Волнение, развивающееся в плёсе, недостаточно для интенсивного размыва мелководий. В Весьегонском расширении развитию волнения препятствуют значительная изрезанность береговой линии и наличие большого количества островов.

В Шекснинском плёсе накопление отложений в русловой части начинается с верхнего участка (табл. 34). На участках III-2 и III-3 наибольшая высота слоя наблюдается на глубинах более 14 м. Эти особенности обусловлены малой проточностью плёса. Взвеси, оседающие в наиболее глубоких его частях, не подвергаются в дальнейшем трансседиментации под воздействием стоковых течений. Кроме того, подошва склонов русла, где наблюдается наибольшая аккумуляция отложений, располагается на этих участках ниже изобаты 14 м. В остальном распределение мощности отложений в Шекснинском плёсе не отличается существенно от такового в Волжском и Моложском плёсах.

Приводимые данные о распределении мощности донных отложений в речных плёсах свидетельствуют о том, что интенсивность накопления отложений по длине плёса изменяется на разных глубинах неоднозначно. На малых глубинах, где преобладающей формой гидродинамической активности является волнение, интенсивность накопления отложений, достигнув сравнительно небольшого максимума (0.15—0.25 см в год) на верхнем участке, уменьшается вниз по плёсу до нуля. На больших глубинах, где подвижность водной массы определяется главным образом течениями, интенсивность накопления отложений возрастает вниз по плёсу, достигая 2—3 см в год (рис. 39).

В Главном плёсе водохранилища распределение мощности донных отложений характеризуется наибольшим разнообразием

Таблица 33

Накопление донных отложений в Моложском плёсе Рыбинского водохранилища

Участок	Глубина при НПУ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Площадь, км²	Объем отложений, км³	Среднее годовое накопление, см
II-1	0—4	Илистый песок, песчанистый серый ил	1.6	89.2	0.00143	0.06
	4—6	Пылеватый песок, песчанистый серый и серый илы	3.1	25.3	0.00078	0.12
	6—8	Серый ил, илистый песок	1.5	24.3	0.00036	0.06
	8—10	Серый песчанистый ил	28.0	3.2	0.00089	1.12
II-2	0—4	Пылеватый песок, мелкий илистый песок	2.0	55.0	0.00110	0.08
	4—6	Пылеватый песок, песчанистый серый и серый илы	3.1	14.6	0.00045	0.12
	8—10	Песчанистый серый ил	28.0	1.6	0.00045	1.12
	10—14	Песчанистый серый ил, пылеватый песок	5.1	5.5	0.00028	0.2
		Всего	—	—	0.00574	—

Таблица 34

Накопление донных отложений в Шекснинском плёсе Рыбинского водохранилища

Участок	Глубина при НПУ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Площадь, км²	Объем отложений, км³	Среднее годовое накопление, см
III-4	0—4	Илистый песок, песчанистый серый и серый илы	1.5	243.1	0.00364	0.06
	4—6	Серый ил	5.0	53.0	0.00265	0.20
	6—8	То же	7.0	1.9	0.00013	0.28
	8—10	Песчанистый серый и серый илы	25.5	2.9	0.00074	1.02
	> 10	Песчанистый серый ил	22.0	9.9	0.00218	0.88
III-2	4—6	Илистый песок	2.5	42.3	0.00106	0.10
	6—8	Серый ил	12.5	40.3	0.00504	0.50
	8—10	То же	6.3	0.2	0.00001	0.25
	10—14	» »	13.0	4.5	0.00056	0.52
	> 14	» »	45.0	3.5	0.00158	1.80
III-3	6—8	Илистый песок, песчанистый серый и серый илы	2.5	60.9	0.00152	0.10
	8—10	Серый ил	9.5	17.9	0.00170	0.38
	10—14	То же	27.0	3.9	0.00105	1.08
	> 14	Серый и переходный илы	65.0	3.3	0.00214	2.60
		Всего	—	—	0.02400	—

(табл. 35). Верхняя граница зоны аккумуляции подвержена значительным колебаниям в зависимости от гидродинамической активности водной массы на участках и механического состава первичных грунтов. Следует заметить, что первичные грунты восточной части плёса (участки IV-7-10) характеризуются более тяжелым механическим составом, чем таковые западной его части. На большинстве участков (IV-3, 5, 7-12) аккумуляция отложений начинается в диапазоне глубин 4—6 м. Интенсивность накопления отложений на этих глубинах в открытых частях плёса

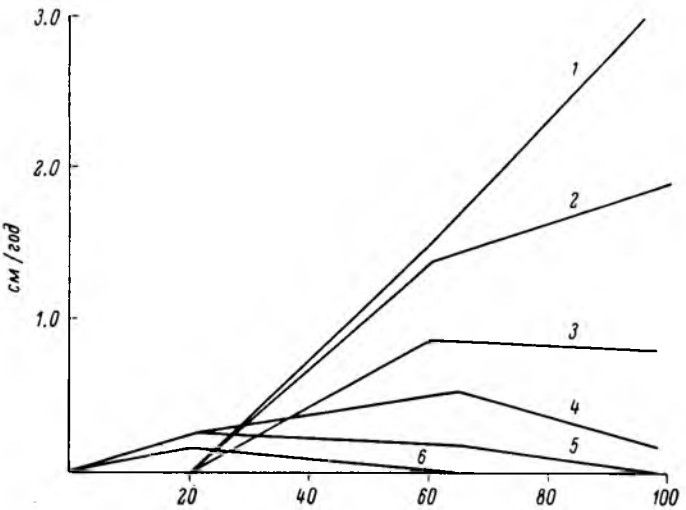


Рис. 39. Изменение мощности донных отложений по длине Волжского плёса на различных глубинах.

1 — глубина больше 14 м, *2* — 10—14, *3* — 8—10, *4* — 6—8, *5* — 4—6, *6* — 0—4 м. *По оси абсцисс* — расстояние от плотины Угличской ГЭС, км.

невелика. Высота слоя отложений, представленных пылеватым песком, к 1965 г. составляла всего 1—3 см. В тех местах, где высокая гидродинамическая активность водной массы сочетается с наличием легко поддающихся размыву первичных грунтов, граница зоны аккумуляции смещается на глубины 6—8 и даже 8—10 м (участки IV-1, 2, 6). Пространства, располагающиеся выше зоны аккумуляции, заняты размытыми почвами — песками. Детальное обследование мелководий на участке IV-1 показало, что на глубинах 0—6 м происходил размыв первичных грунтов, следствием которого и явилось образование песков (первичный грунт, как правило, песчаная и супесчаная почвы). Ниже изобаты 6 м размыв сменялся аккумуляцией. На участках IV-2, 6 следы размыва прослеживаются местами вплоть до глубин 10 м.

Интенсивность накопления отложений в верхних горизонтах зоны аккумуляции повсеместно невелика (табл. 35). Иногда на-

Таблица 35

Накопление донных отложений в Главном плёсе Рыбинского водохранилища

Участок	Глубина при НПУ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Площадь, км²	Объем отложений, км³	Среднее годовое накопление, см
IV-1	6—8	Пылеватый песок	2.4	81.8	0.00196	0.096
	8—10	Песчанистый серый ил . .	4.8	116.6	0.00560	0.19
	10—14	Серый ил	76.0	4.5	0.00342	3.04
		Серый и торфянистый илы	18.5	10.8	0.00200	0.74
	> 14	Серый и переходный илы	131.0	6.2	0.00811	5.25
IV-2	6—8	Серый ил	7.0	1.0	0.00007	0.28
	8—10	Пылеватый песок, серый ил	4.4	125.6	0.00553	0.18
	10—14	Серый и переходный илы	6.9	53.3	0.00368	0.28
		Серый ил	76.0	15.8	0.01200	3.09
	> 14	То же	47.0	3.0	0.00141	1.88
IV-3	4—6	Пылеватый песок	3.0	63.1	0.00189	0.12
	6—8	Пылеватый песок, песчанистый серый ил	6.4	78.9	0.00505	0.26
	8—10	Серый и переходный илы	2.7	53.6	0.00145	0.11
	10—14	Серый ил	29.0	33.0	0.00957	1.16
	> 14	Переходный ил	93.6	3.5	0.00326	3.72
IV-4	0—4	Пылеватый илистый песок	1.0	143.9	0.00144	0.04
	4—6	Илистый песок, песчанистый серый ил	10.5	31.9	0.00335	0.42
	6—8	Песчанистый серый и серый илы	9.5	7.5	0.00071	0.38
	8—10	Серый ил	10.0	0.1	0.00001	0.40
	10—14	Песчанистый серый ил, илистый песок	12.0	3.4	0.00041	0.48
	> 14	Песчанистый серый ил . .	4.5	3.1	0.00014	0.18
IV-5	4—6	Пылеватый песок	2.0	42.8	0.00086	0.08
	6—8	Пылеватый песок, песчанистый серый и переходный илы	8.0	33.8	0.00270	0.32
	8—10	Пылеватый песок, торфянистый ил	0.5	28.1	0.00014	0.02
	10—14	Переходный ил	70.0	4.0	0.00280	2.80
		То же	24.6	6.8	0.00167	0.98
	> 14	» »	41.0	1.4	0.00057	1.64
IV-6	8—10	Песчанистый серый ил . .	0.8	41.7	0.00033	0.03
	10—14	Серый и переходный илы	11.5	39.0	0.00449	0.46
		Торфянистый ил	50.0	4.4	0.00220	2.0
IV-7	0—4	То же	5.0	10.0	0.00050	0.2
		Пылеватый песок	1.0	11.8	0.00012	0.04
	4—6	Торфянистый ил	12.0	6.0	0.00072	0.48
	6—8	Илистый песок	1.1	44.2	0.00049	0.04
	8—10	Илистый песок, песчанистый серый ил	2.2	21.3	0.00047	0.09
	10—14	Торфянистый и переходный илы	14.7	137.3	0.02020	0.59
	> 14	Торфянистый ил	50.0	2.4	0.00120	2 0

Таблица 35 (*продолжение*)

Участок	Глубина при НПУ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Площадь, км²	Объем отложений, км³	Среднее годовое накопление, см
IV-8	4—8	Пылеватый песок	1.5	109.9	0.00165	0.06
	8—10	Серый ил	1.5	71.4	0.00107	0.06
	10—14	Торфянистый и переходный илы	28.0	74.7	0.02100	1.12
	> 14	Торфянистый ил	130.0	3.1	0.00404	5.20
IV-9	0—4	То же	10.5	50.0	0.00525	0.42
	4—6	Торфянистый ил	10.5	30.0	0.00315	0.42
		Пылеватый песок	2.4	46.6	0.00112	0.1
	6—8	Песчанистый серый ил	2.0	28.6	0.00065	0.08
	8—10	Торфянистый ил	23.0	28.6	0.00657	0.92
	> 10	То же	28.0	12.0	0.00336	1.12
IV-10	4—8	Пылеватый песок	1.0	128.3	0.00128	0.04
	8—10	Пылеватый песок, переходный ил	9.2	61.4	0.00564	0.38
	10—14	Серый и переходный илы	9.0	79.1	0.00711	0.36
	> 14	Переходный и торфянистый илы	150.0	3.9	0.00465	6.0
IV-11	4—6	Мелкий песок, серый переходный, торфянистый илы	12.4	46.0	0.00570	0.50
	6—8	Переходный и серый илы	26.5	22.4	0.00594	1.06
	> 8	Серый и торфянистый илы	85.5	0.3	0.00026	3.42
IV-12	4—6	Пылеватый песок	12.4	40.3	0.00500	0.50
	6—8	Переходный ил	11.0	29.9	0.00329	0.44
	8—10	Переходный и торфянистый илы	43.0	15.3	0.00658	1.72
	10—14	То же	75.0	12.0	0.00900	3.0
	> 14	» »	108.0	3.0	0.00324	4.32
		Всего	—	—	0.21607	—

блюдается резкое уменьшение высоты слоя отложений на глубинах 8—10 м при переходе от преимущественно песчанистых отложений к илистым (участки IV-3, 5). Это может вызываться значительными различиями в гидравлической крупности песчанистых и илистых частиц. На тех центральных участках плёса, где глубины от 8 до 10 м заняты преимущественно илами, мощность илов невелика (0.5—4.8 см). Ниже изобаты 10 м располагается зона, на которую не распространяется размывающее действие волнения. Здесь уменьшается вероятность трансседиментации, и как следствие на большей части плёса резко увеличивается высота слоя отложений. В диапазоне глубин 10—14 м повышенные мощности иловых отложений (70—76 см) имеют место в пойменных озерах, старицах, протоках, площадь которых, по нашим

подсчетам, составляет около 24 км². Условия илонакопления в таких местных углублениях существенно отличаются от условий на прилегающих к ним участках. Углубления служат ловушками для трансседиментационных взвесей с окружающих пространств.

На глубинах более 14 м интенсивность илонакопления максимальна на всех участках. Высота слоя отложений к 1965 г. достигла 40—150 см. Исключение составляет участок IV-4

Таблица 36

Вес донных отложений Рыбинского водохранилища

Плёс	Тип отложений	Объем отложений, км³	Объемный вес, г/см³	Вес отложений, тыс. т
Волжский	Песчанистый серый ил	0.01502	0.34	5110
	Серый ил	0.01718	0.29	4980
	Переходный ил . . .	0.00514	0.15	770
Моложский	Пылеватый песок . .	0.00110	1.53	1680
	Илистый песок	0.00145	1.01	1460
	Песчанистый серый ил	0.00260	0.34	880
	Серый ил	0.00059	0.29	170
Шекснинский	Илистый песок	0.00279	1.01	2820
	Песчанистый серый ил	0.00427	0.34	1450
	Серый ил	0.01587	0.29	4600
	Переходный ил . . .	0.00107	0.15	160
Главный	Пылеватый песок . .	0.02509	1.53	38400
	Илистый песок	0.00333	1.01	3360
	Песчанистый серый ил	0.01262	0.34	4290
	Серый ил	0.04862	0.29	14100
	Переходный ил . . .	0.06446	0.15	9670
	Торфянистый ил . .	0.06195	0.15	9290
	Всего	0.283	—	103200

(табл. 35). Здесь на русловых станциях весной ежегодно прослеживаются стоковые течения, приводящие к смыву донных отложений, и распределение мощности по глубине сходно с наблюдающимся в речных плёсах.

Сопоставление максимальной мощности отложений на различных участках Главного плёса показывает, что на больших глубинах не прослеживается четкой связи интенсивности илонакопления со степенью гидродинамической активности. По-видимому, в данном случае решающую роль могут играть местоположение, характер источников и объем поступающего на участок грунтообразующего материала.

Подводя итог характеристике накопления донных отложений в Главном плёсе, можно сказать, что основной отличительной чертой его является меньшая, чем в речных плёсах, мощность вто-

ричных грунтов на большей части дна выше изобаты 10 м. Исключение составляют изолированные от открытой части водохранилища участки. Средняя годовая высота слоя отложений характеризуется в этом плёсе наибольшей изменчивостью и колеблется от 0 до 6 см в год. Непосредственное исследование процесса седиментации методом ловчих стаканов показало, что на участках Главного плёса с максимальным осадконакоплением (т. е. на глубинах больше 10 м) высота слоя осадков, отлагающихся за период с декабря по март, равна всего 0.2—0.3 мм (Зиминова, Трифонова, 1963). Таким образом, основная масса взвешенного материала поступает на дно, когда водоем свободен ото льда.

Для расчета веса отложений использовались объемный вес различных типов донных отложений водохранилища (см. главу VII). Результаты расчета представлены в табл. 36. Общий объем вторичных донных отложений в Рыбинском водохранилище составлял к 1965 г. 0.283 км^3, вес — 103 200 тыс. т. Интересно сопоставить полученные результаты с прогнозом заиления водоема. По прогнозу, приведенному В. П. Матвеевым (1950), объемы заиления за 25 лет выражаются следующими цифрами (км^3).

Участок Волжского плёса I-1	0.0019
Моложский плёс	0.0025
Шекснинский плёс	0.0028
Остальная часть водохранилища	0.0282
Всего	0.0354

Сравнение показывает, что прогноз оправдался только для проточного участка Волжского плёса (I-1). Для всех остальных участков водохранилища фактические объемы заиления в 2—9 раз превосходят расчетные. Приводимый выше прогноз был основан на предпосылке, что основными факторами заиления являются твердый сток рек и переформирование берегов, и не учитывал поступления грунтообразующего материала из других местных источников, которое, как показала их количественная оценка (см. главу III), весьма значительно. Этим и объясняется существенное различие между фактическими и прогнозированными объемами заиления.

Для сравнения водохранилищ по средним темпам осадконакопления рассчитаны средние линейные, весовые и объемные показатели осадконакопления (табл. 37). Размеры аккумуляции взвешенного вещества в водоеме определяются суммарной величиной его прихода и гидролого-морфометрическими особенностями водоема. Влияние морфометрии проявляется прежде всего в суммарной величине прихода взвешенного вещества на единицу поверхности дна. Во всех водохранилищах интенсивность поступления взвесей, образованных в результате действия как зональ-

ных, так и азональных факторов, выражается величинами одного порядка. Вместе с тем Рыбинское водохранилище резко превосходит прочие водохранилища Верхней Волги своими размерами. В результате суммарный приход взвесей в нем (около 1 тыс. т на 1 км^2 в год) вдвое меньше, чем в Иваньковском и Угличском водохранилищах (около 2 тыс. т на 1 км^2 в год). Однако в Рыбинском водохранилище седиментируется 95% поступающих взвесей, а в Иваньковском и Угличском соответственно 71 и 56% (см. стр. 130, 132). Поэтому разница в весе осадков, приходящихся на 1 км^2 поверхности дна водохранилищ, менее значительна (табл. 37). Наблюдающееся несоответствие между средними весовыми и ли-

Таблица 37

Темпы осадконакопления в Верхневолжских водохранилищах

Водохранилище	Продолжительность расчетного периода, годы	Вес донных отложений, тыс. т			Объем донных отложений, км^3		Средняя высота слоя отложений, см в год
		за период	за год	за год на 1 км^2 дна	за период	за год	
Иваньковское	32	15665	490	1.5	0.02120	0.00066	0.20
Угличское	29	8030	277	1.1	0.0123	0.00042	0.17
Рыбинское	25	103200	4128	0.9	0.283	0.0113	0.25

нейными показателями осадконакопления в Рыбинском водохранилище объясняется специфичностью его грунтового комплекса, основные типы грунтов которого характеризуются повышенным в сравнении с грунтами других верхневолжских водохранилищ содержанием органического вещества (10—70%) и как следствие малым объемным весом.

Баланс взвешенных веществ

Имеющиеся в нашем распоряжении данные о поступлении взвесей и накоплении донных отложений позволили составить баланс взвешенных веществ в верхневолжских водохранилищах. Способ выражения процессов превращения вещества и энергии в водоемах замедленного водообмена в форме баланса был предложен Л. Л. Россолимо (1934) и в настоящее время широко используется в лимнологических исследованиях. Баланс взвешенного вещества позволяет дать количественную оценку роли отдельных факторов в накоплении донных отложений в водохранилищах различного типа и характеризовать трансформацию стока наносов при регулировании водного стока.

Уравнение баланса взвешенных веществ имеет одинаковую структуру для всех водохранилищ каскада (Зиминова, Курдин, 1972а, 1972б, 1974): Нр+Р+ПР=О+Сб+В, где Нр — сток реч-

ных наносов; Р — продукты размыва берегов и ложа водоема; ПР — продукция планктона и высшей водной растительности; О — осадконакопление; Сб — сброс взвесей через гидросооружения; В — содержание взвесей в водной массе в конце расчетного периода. За расчетный принят весь период существования водохранилищ. Для Иваньковского водохранилища к моменту составления баланса он равнялся 32 годам (1937—1968 гг.), для Угличского — 29 (1940—1968 гг.), для Рыбинского — 25 годам (1941—1965 гг.).

Рассмотрим особенности баланса взвешенных веществ в каждом водохранилище. Сток взвешенных наносов рек в Иваньковское водохранилище составил за расчетный период 6250 тыс. т, продукция планктона и высшей водной растительности — 1152 тыс. т (глава III). В расходной части баланса величина осадконакопления равна 15 665 тыс. т. Сброс взвесей через сооружения Иваньковского гидроузла складывается из сброса в Угличское водохранилище и в канал им. Москвы. Сток взвесей в створе Иваньковской ГЭС равен 5408 тыс. т (см. главу III). При расчетах среднего многолетнего поступления взвешенных веществ в канал им. Москвы использовались данные по среднему многолетнему водозабору в канал и рассчитанная средняя многолетняя мутность в створе Иваньковской ГЭС. Подсчитанная таким образом величина годового поступления взвешенных веществ в канал равняется 24 тыс. т или 768 тыс. т за расчетный период. Средняя ошибка, так же как и для стока взвесей в створе ГЭС, равна 20% (154 тыс. т). Содержание взвесей в водной массе в конце расчетного периода (на 31 XII 1968) в баланс не включалось — величина его (5 тыс. т) ничтожно мала в сравнении с остальными статьями. Это относится и к балансам двух других водохранилищ. Отсутствие количественных характеристик не позволило произвести непосредственное определение количества вещества, образующегося за счет размыва берегов и ложа водоема. Суммарная величина этого компонента приходной части баланса была вычислена из балансового уравнения и составила 14 439 тыс. т, или около 66% общего прихода. Ошибка этой величины, рассчитанная как ошибка суммы членов балансового уравнения, составляет 15%.

Все компоненты балансового уравнения сведены в табл. 38.

Как следует из приведенных данных (табл. 38), основную роль в балансе взвешенных веществ в Иваньковском водохранилище играет автохтонное взвешенное вещество, источником которого является размыв берегов, мелководий, продуцирование фитопланктона и высшей водной растительности. Сток речных наносов составляет 29% общего прихода взвесей. Бо́льшая часть взвесей, поступивших в водохранилище и образовавшихся в нем, осаждается в самом водоеме (71%).

Представленные соотношения в табл. 38 — суммарные за весь рассматриваемый период. Естественно, что на протяжении этого времени они не оставались постоянными. Можно полагать,

что в первые 5—10 лет существования водоема более интенсивно шел процесс абразии берегов и дна, общая величина годового прихода превышала среднюю многолетнюю, более высокими были темпы осадконакопления. В последние годы интенсивность абразионных процессов снизилась в результате завершения формирования рельефа части открытых мелководий. Это должно повлечь за собой снижение темпов седиментации. Однако образование автохтонных взвесей имеет место и в настоящее время. Об этом

Таблица 38

Баланс взвешенных веществ в Иваньковском водохранилище за период 1937—1968 гг.

Приход			Расход		
составляющие	тыс. т	% от суммы прихода	составляющие	тыс. т	% от суммы расхода
Сток речных наносов	6250	29	Сток взвесей через Иваньковскую ГЭС . .	5408	25
Размыв берегов и дна	14439	66	Сток взвесей в канал им. Москвы	768	4
Продукция планктона и высшей водной растительности . .	1152	5	Осадконакопление	15665	71
Всего . .	21841	100	—	21841	100

свидетельствует сравнение внутригодового хода мутности на входных и замыкающем створах водохранилища (рис. 40).

В течение летне-осеннего периода мутность вод, поступающих в водохранилище, иногда бывает меньше, чем сбрасываемых из него, или близка к ней. В то же время анализ скоростного режима водохранилища в этот период показывает, что должны происходить седиментация речных взвесей и обусловленное ею уменьшение стока взвесей в створе гидроузла. В действительности этого не наблюдается. Отсутствие существенного уменьшения мутности в створе гидроузла в летне-осенний период может быть объяснено лишь образованием автохтонных взвесей, которое частично компенсирует уменьшение стока аллювиальных наносов, вызываемое седиментацией. Малая зарегулированность весеннего стока наносов (Зиминова, Курдин, 1970) вместе с наличием автохтонных взвесей в стоке через гидроузел приводят к тому, что количественная трансформация стока наносов водохранилищем очень не-

велика и обусловлена перераспределением водного стока (забор воды в канал им. Москвы).

Для Угличского водохранилища составлен «замкнутый» баланс взвешенного вещества, т. е. каждая статья баланса определена независимо от других. По приведенным расчетам (см. главу III) сток взвешенных наносов рек, впадающих в Угличское водо-

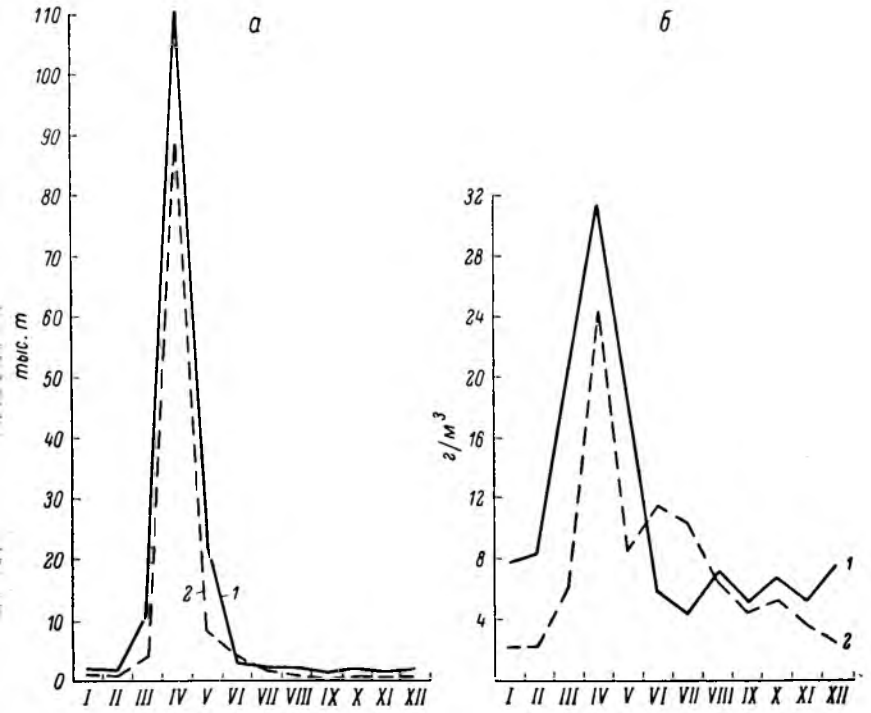


Рис. 40. Сток взвешенных наносов (*а*) и мутность (*б*) на входных (*1*) и замыкающем (*2*) створах Иваньковского водохранилища в 1968 г.

хранилище, и сток наносов в створе Иваньковского гидроузла составляют за период 1940—1968 гг. соответственно 2260 и 4900 тыс. т, размыв берегов — 10 700 тыс. т, продукция фитопланктона и высшей водной растительности — 550 тыс. т, сброс взвесей через Угличскую ГЭС — 6350 тыс. т. Осадконакопление за расчетный период, как было указано выше, равно 8030 тыс. т. Баланс, составленный из этих величин, имеет невязку, равную 4030 тыс. т, или 24% от уравненного баланса (табл. 39). Невязка обусловлена, очевидно, большими ошибками в определении отдельных составляющих баланса. Выше указывалось, что средний многолетний сток наносов в створе Иваньковской ГЭС определен с ошибкой 20%, сток боковых притоков — 16, ошибка величины

осадконакопления составляет 21%, стока наносов в створе Угличской ГЭС — 19%.

Оценить ошибку третьей приходной статьи баланса — поступления взвешенного вещества за счет размыва берегов — не представлялось возможным в силу ограниченного количества наблюдений. Распространение результатов наблюдений по двум ключевым участкам на все абразионные берега водохранилища вносит погрешность в окончательный результат расчета.

Таблица 39

Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище за 1940—1968 гг.

Приход			Расход		
составляющие	тыс. т	% от суммы прихода	составляющие	тыс. т	% от суммы расхода
Сток наносов в створе Иваньковской ГЭС	4900	27	Сброс взвесей через Угличскую ГЭС . . .	6350	44
Сток речных наносов	2260	12	Осадконакопление . .	8030	56
Размыв берегов . . .	10700	58			
Продукция планктона и высшей водной растительности	550	3			
Всего	18410	100	Всего	14380	100
Невязка, тыс. т	4030				
Невязка, %	24				

Стандартная ошибка в определении среднего количества взвешенного вещества, поступающего в водохранилище в результате вегетации фитопланктона, для Рыбинского водохранилища, по которому имеется 8-летний ряд наблюдений, составляет около 20%, а ошибка обеспеченностью 99%—66%. По-видимому, для Угличского водохранилища, характеризующегося более однородными условиями формирования фитопланктона, она не должна превышать этой величины. Однако и при максимально возможных величинах указанной ошибки влияние ее на невязку баланса будет весьма незначительно.

Расчет суммарной ошибки балансового уравнения без учета ошибки третьей приходной статьи показал, что имеющая место невязка вполне может быть обусловлена погрешностями в определении отдельных компонентов баланса. Можно полагать, что с наибольшей ошибкой вычислено поступление взвешенного материала за счет размыва берегов.

Определение погрешностей расчета для большинства компонентов баланса позволяет с известной степенью надежности оценить их роль в балансе. В течение 29 лет существования водоема большая часть взвесей формировалась в самом водохранилище за счет размыва берегов и шла на образование вторичных донных отложений (табл. 39). В приходной части баланса Угличского водохранилища в сравнении с балансом Иваньковского водохранилища выше доля взвешенных наносов рек. Это происходит не за счет большего развития процессов эрозии на водосборе (средне-

Таблица 40

Компоненты баланса взвешенного вещества в Угличском водохранилище, и их временные изменения, % от общего прихода (расхода)

Статьи	1940—1951	1952—1961	1962—1968	1940—1968
Приход				
Сток наносов	29	45	63	39
Размыв берегов	68	52	30	58
Планктон и высшая водная растительность	3	3	7	3
Расход				
Сброс взвесей через Угличскую ГЭС	35	50	68	44
Осадконакопление	65	50	32	56

многолетние модули стока наносов в бассейнах всех водохранилищ почти одинаковы), а в силу сокращения поступления материала от размыва мелководий. Более однородный состав поступающих в водоем взвесей обусловил и характер вторичных отложений, представленных только серым песчанистым и серым илами со сравнительно небольшим содержанием органического вещества (4.3—10.9%).

На основе имеющихся данных по суммарному объему береговых переформирований за периоды 1940—1951, 1952—1961 и 1962—1968 гг., а также по рассчитанному за эти же периоды стоку речных наносов и сбросу взвесей через Угличскую ГЭС ориентировочно определена доля отдельных компонентов в балансе за указанные периоды (табл. 40).

Как следует из табл. 40, в приходной части баланса происходит относительное возрастание роли речных наносов и планктона за счет уменьшения поступления абразионного материала, в расходной почти вдвое увеличивается относительная величина сброса взвесей через Угличский гидроузел. Вместе с тем по мере увели-

чения срока эксплуатации водоема происходили постепенное уменьшение общего прихода взвешенного вещества в водоем и уменьшение величины осадконакопления.

Характерная особенность Угличского водохранилища, выявленная при сопоставлении составляющих баланса,— бо́льшая величина отношения расхода наносов к их приходу. По результатам исследований на крупных долинных водохранилищах сезонного регулирования, сброс взвесей в нижний бьеф составляет 4—30% от стока речных наносов в водохранилище (Широков, 1963; Ярославцев, Шмелева, 1969). В Угличском водохранилище данное соотношение достигает 90%, т. е. количественная трансформация годового стока речных наносов водохранилищем незначительна. Причины столь незначительного влияния водохранилища на сток наносов Волги заключаются, так же как и для Иваньковского водохранилища, в характере регулирования водного стока — малой зарегулированности весеннего стока, и в наличии автохтонных взвесей в стоке через гидроузел в летне-осенний период.

Суммарный сток взвешенных наносов, поступивших в Рыбинское водохранилище в 1941—1965 гг., равен 19 000 тыс. т (см. главу III). Продукция фитопланктона составила за этот период 2500 тыс. т, размыв сплавин — 5280 тыс. т вещества, осадконакопление — 103 200 тыс. т. В уравнении баланса взвешенного вещества в Рыбинском водохранилище оставались неизвестными два члена — поступление материала за счет размыва берегов и дна и сброс взвесей через Рыбинский гидроузел. По вопросу о величине стока взвешенных веществ из водохранилища существовало мнение, что она намного превышает сток наносов его притоков (Белых, 1965).

Для уточнения этого в 1967 г. были проведены систематические наблюдения над стоком взвешенных наносов в водоводах Рыбинской ГЭС (Курдин, Зиминова, 1971а). Установлено, что сезонная динамика мутности в створе ГЭС характеризуется наименьшими величинами в период ледостава, резким возрастанием во время интенсивного наполнения, максимальными значениями в период, свободный ото льда. Такой годовой ход мутности в сочетании с характером регулирования стока обусловливает существенное внутригодовое перераспределение стока взвешенных веществ в створе плотины по сравнению с естественными условиями. Месячный сток взвешенных веществ через Рыбинский гидроузел в 1967 г. (тыс. т) приведен ниже. Наименьшее количество сбрасываемого через гидроузел взвешенного вещества приходится на апрель, максимальное — на октябрь.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
10.2	10.7	4.3	0.9	9.5	14.2	18.5	11.8	17.9	30.7	20.5	16.6

Анализ годового хода мутности в створе плотины показывает,

что ее среднегодовая величина определяется не только мутностью вод, поступающих в водохранилище, т. е. интенсивностью эрозионных процессов на водосборе, но в значительной степени процессами, происходящими в самом водоеме.

Мертвый затопленный лес в Главном плёсе Рыбинского водохранилища.

Наши исследования динамики и распределения мутности Рыбинского водохранилища за ряд лет показали, что в период ледостава ее величина и колебания от года к году минимальны (Зиминова, 1963). Средняя мутность вод, сбрасываемых из водохранилища в период его интенсивного наполнения, колеблется

в зависимости от соотношения объемов вод различного генезиса в приплотинном участке. Наблюдения весной 1961 и 1967 гг. свидетельствуют о том, что пределы этих колебаний от года к году меняются незначительно. Средняя мутность сбрасываемых вод весной 1967 г. была равна мутности весеннего периода 1961 г., близкого по условиям весеннего водообмена к среднемноголетнему. Наибольшим колебаниям в створе гидроузла подвержена мутность в период, свободный ото льда. Учитывая, что величины ее в это время имеют максимальные значения, а сброс воды в нижний бьеф за май—ноябрь составляет 58% общего годового сброса, можно утверждать, что величина мутности в указанный период в значительной степени определяет ее среднегодовое значение.

Основные факторы, обусловливающие количество и состав взвесей в это время в Главном плёсе, — взмучивание донных отложений, определяемое ветровым режимом, и развитие фитопланктона. Средние месячные скорости ветра по гидрометеостанции мыс Рожновский (м/сек.) приведены ниже. Поскольку ветровые условия в летне-осенний период 1967 г., так же как и величина продукции фитопланктона под 1 м^2 (см. табл. 14), были близки к среднемноголетним, мы сочли возможным использовать среднегодовую мутность 1967 г. (6.7 г/м^3) при расчетах многолетнего сброса взвешенных веществ через Рыбинскую ГЭС. Среднегодовой расход взвешенных веществ, по нашим подсчетам, равен 6.7 кг/сек., а сток за 25-летний период составляет 5280 тыс. т. Поступление взвешенного вещества за счет размыва берегов и дна получено как разность между суммой расходных статей и суммой первых трех приходных статей баланса (табл. 41).

Период наблюдения	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Теплый период
1967	4.5	4.9	4.9	4.9	5.7	7.3	6.3	5.4
1951—1962 (по: Гущина, 1966)	4.8	4.9	5.0	5.1	6.1	6.2	6.2	5.4

Как следует из приведенных данных (табл. 41), эта составляющая приходной части баланса имеет наибольшую величину. Если учесть, что около 46 000 тыс. т приходится на долю береговой абразии, то количество материала, образующегося за счет донной абразии, составляет около 36 000 тыс. т, т. е. донная абразия как источник грунтообразующего материала имеет не меньшее значение, чем береговая.

Приведенные балансовые расчеты показывают, что в первые 25 лет существования Рыбинского водохранилища ведущую роль в накоплении донных отложений играло автохтонное взвешенное вещество, поступление которого обусловлено действием азональных факторов (размыв берегов, ложа водоема и торфяных сплавин). Действие этих факторов привело к созданию в водохранилище специфического грунтового комплекса, основные типы грунтов которого характеризуются повышенным в сравнении

с грунтами большинства долинных водохранилищ содержанием органического вещества. Эта особенность грунтового комплекса водохранилища обусловлена интенсивной переработкой почвенного слоя затопленной суши и размывом сплавин. В 60-е годы резко уменьшился размыв сплавин и сократилось поступление материала за счет размыва мелководий. Намечается тенденция к уменьшению поступления взвешенного вещества за счет размыва берегов. Учет происходящих в балансе изменений позволяет высказать некоторые предположения относительно средней величины годового поступления взвешенных веществ в будущем. Если

Таблица 41

Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище за 1941—1965 гг.

Приход			Расход		
составляющие	тыс. т.	% от суммы прихода	составляющие	тыс. т	% от суммы расхода
Сток наносов рек	19000	18	Накопление донных отложений . . .	103200	95
Продукция фитопланктона	2500	2	Сток через гидроузел	5280	5
Размыв сплавин . .	5280	5			
Размыв берегов и дна	81720	75			
Всего	108500	—	Всего	108500	—

исключить из приходной части баланса размыв сплавин и мелководий и принять, что интенсивность переформирования берегов, согласно прогнозу (Иванов, 1965), уменьшится втрое, то суммарная величина годового прихода взвешенных веществ также уменьшится приблизительно в 2.5 раза. При условии сохранения существующего режима эксплуатации водохранилища сброс взвешенных веществ через гидроузел останется прежним, а годовое осадконакопление уменьшится в 3 раза. На фоне общего снижения интенсивности осадконакопления возрастает роль зональных факторов этого процесса, к которым мы относим сток взвешенных наносов рек и продукцию фитопланктона. Их доля в общем приходе взвешенного вещества в водоем увеличится от 20 до 40%. Вместе с тем в связи с сокращением поступления взвешенного органического вещества из местных источников возрастет доля аллохтонных органических взвесей в общем балансе органического вещества.

Составленный баланс убедительно показывает, что количество взвешенных веществ, поступающих в водохранилище с водосбора, значительно превышает сброс в нижний бьеф. Расчет среднего

многолетнего стока взвесей в створе Рыбинской ГЭС и сравнение его со средним многолетним стоком притоков (табл. 41) показывает, что сток наносов в результате регулирования уменьшился примерно на 70%. Следовательно, образование автохтонных взвесей не компенсирует полностью уменьшения стока за счет аккумуляции речных наносов. Количественная трансформация стока наносов Рыбинским водохранилищем в отличие от других водохранилищ каскада весьма значительна. Необходимо отметить, что вместе с уменьшением стока наносов произошло изменение его внутригодового распределения (Курдин, Зиминова, 1971а). Наименьшее количество взвешенных веществ сбрасывается через гидроузел в апреле, что обусловлено минимальными сбросами воды в этом месяце. Максимальный сток взвесей приходится на осень (41%), когда расходы воды через ГЭС сравнительно высоки, а мутность максимальна.

Балансы взвешенного вещества в верхневолжских водохранилищах свидетельствуют о том, что основная масса материала, формирующего донные отложения, поступает в эти водоемы за счет абразии берегов и ложа (60—80% общего прихода). На долю речных наносов приходится всего 20—40% прихода взвешенного вещества.

Указанная закономерность характерна для всех равнинных водохранилищ, расположенных в зонах слабого и умеренного развития эрозионных процессов (Широков, 1969; Ярославцев, Шмелева, 1969; Синайская, Иванов, 1973).

Пути формирования грунтового комплекса водохранилищ

Количественная характеристика компонентов баланса взвешенного вещества и повторные грунтовые съемки водохранилищ верхневолжского каскада, являющихся наиболее старыми в нашей стране крупными искусственными водоемами со сроком эксплуатации более 30 лет, позволяют высказать ряд соображений по поводу общей направленности процесса формирования ложа водохранилищ.

Грунтовый комплекс, сформировавшийся в первые годы существования водоема, со временем может подвергаться существенным изменениям, причины которых обусловлены временными изменениями гидродинамической активности водных масс и интенсивности поступления грунтообразующего материала из различных источников. Гидродинамическая активность — основной фактор, от которого зависят интенсивность переработки первичных грунтов, трансседиментация частиц грунта, положение границ между отложениями разного гранулометрического состава. Состав грунтов определяется качеством аллохтонных и автохтонных взвесей, вступающих в различных соотношениях в контакт при грунтообразовании. Если количество взвешенного вещества, поступающего в водохранилище и вырабатываемого в нем, из года

в год остается постоянным, то в водоеме образуется устойчивый грунтовый комплекс, состав грунтов которого со временем меняется незначительно под влиянием биохимических процессов, происходящих в каждом типе грунта. При необратимых изменениях в составе аллохтонных или автохтонных взвесей возможны значительные изменения в составе грунтов: из грунтового комплекса водохранилища, сформировавшегося в начальном периоде существования водоема, могут выпадать отдельные грунты или появляются новые.

Из водохранилищ верхневолжского каскада наибольшие временные изменения гидродинамической активности водных масс наблюдались на Рыбинском водохранилище (Курдин, Зиминова, 1971б). Подготовка его ложа к наполнению ограничилась вырубкой леса на будущих судоходных трассах. Лесные массивы, расположенные за пределами судоходных трасс, включая площади, занятые кустарником, остались невырубленными. К началу заполнения водохранилища лес и кустарник, оставленные на корню, занимали 1500 км^2, или 33% площади зеркала. Кроме древесной растительности, развитию волнения препятствовали макрофиты, развивающиеся под ее защитой, и торфяные сплавины, которые начали появляться с первых лет существования водохранилища. Таким образом, в начальный период на водохранилище существовали условия, при которых волнение не могло достигать наибольших размеров, возможных при наблюдавшейся гидрометеорологической обстановке и глубинах. Постепенно происходило самоочищение водоема от затопленной древесной растительности. В 1949 г. она сохранялась на 40% площади, занятой ею перед наполнением водохранилища, а в 1961 г. остатки древесной растительности занимали всего 130 км^2 (Тачалов, 1965). Общая площадь торфяных сплавин, всплывших к 1965 г., составляла около 100 км^2, из них около 40% было разрушено волнами. По мере очищения водоема увеличивалась высота волн и возрастало их воздействие на ложе и берега.[1]

В связи с этим начались более интенсивное переформирование первичных и образование вторичных грунтов по всему диапазону глубин. Интенсивность переработки первичных грунтов зависит от повторяемости волн определенной высоты. Чем больше повторяемость волн в данном интервале, тем интенсивнее процессы формирования грунтов на глубинах, до которых распространяется действие этих волн. О повторяемости волн разной высоты можно судить по повторяемости ветра различной скорости. Повторяемость ветра по гидрометеорологической станции «Пункт открытого моря» (средняя за навигационные периоды в 1951—1962 гг.) равна в интервале 0—7 м/сек. 67%, 8—15 м/сек. — 32%, в интер-

---

[1] По Е. М. Селюк (1961), при уменьшении шероховатости дна водохранилища за счет его самоочищения и заиления высота волн возрастает на 10—20%.

вале более 15 м/сек. — около 1%. В октябре за те же годы повторяемость ветра несколько меняется — соответственно 56, 42 и около 2% (Гущина, 1966). Следовательно, на глубинах, равных глубине размывающего действия волн, возникающих при ветре до 7 м/сек., формирование вторичных и переработка первичных грунтов протекают наиболее интенсивно. При волнах, определенных ветром более 15 м/сек., она носит затяжной характер, причем в октябре ввиду понижения уровня воды и возрастания скорости ветра интенсивность процессов на соответствующих глу-

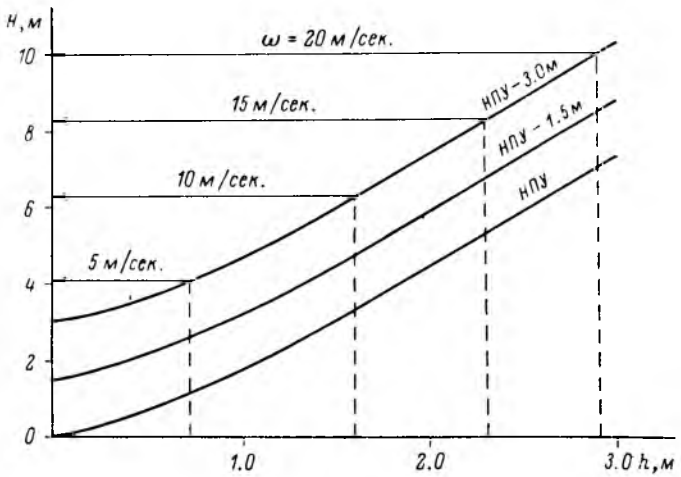


Рис. 41. Кривые зависимости глубины размывающего действия волн (*H*) от высоты волн (*h*) при различных уровнях воды и скоростях ветра (ω) для Рыбинского водохранилища.

бинах возрастает. Вместе с тем усиление штормовой деятельности на водохранилище осенью в сочетании с минимальными уровнями обусловливает распространение размывающего действия волнения до максимально возможных глубин и тем самым определяет положение границы между зонами размыва первичных грунтов, областью образования песчаных отложений и зоной аккумуляции илов.

Глубины размывающего действия волн, вызываемых ветром 5—20 м/сек. при нормальном подпорном уровне (НПУ), уровне обеспеченностью 50% и минимальных уровнях в навигационный период, показаны на рис. 41. При ветрах 5, 10 и 15 м/сек. глубина размывающего действия при наибольших сработках уровня осенью находится в интервале 4—8 м, т. е. площадь дна водохранилища от уреза берега при НПУ до глубины 8 м подвержена наибольшему волновому воздействию. Здесь формирование грунтов должно закончиться в более короткий период, чем в ин-

тервале глубин 8—10 м, так как ветер свыше 15 м/сек. имеет небольшую повторяемость (2% для октября). Глубина 10 м от НПУ может быть принята для Главного плёса водохранилища за

Рис. 42. Схема распределения глубин размывающего действия волн при ветре 20 м/сек. в условиях Рыбинского водохранилища.

1 — 7 м, *2* — от 7 до 8.5, *3* — от 8.5 до 10 м.

границу, ниже которой аккумулируются илистые отложения. Эта глубина совпадает с расчетной глубиной размывающего действия волны, соответствующей ветру 20 м/сек., который не ежегодно, но наблюдается над водохранилищем (Гущина, 1966).

Распределение глубин размывающего действия волн, наблюдающихся на водохранилище при ветре 20 м/сек., показано на рис. 42. Карта-схема, построенная для ветров 8 основных румбов,

позволяет судить о районах наибольшего проникновения волнового воздействия на дно водоема и, следовательно, об участках ложа, где возможны отложения вторичных песков. В речных плёсах, за исключением нижней расширенной части Шекснинского плёса, пески могут наблюдаться до глубины 7 м, в Главном плёсе их появление возможно на глубинах до 10 м, причем в южной части этого плёса гидродинамическая активность, определяемая волнением, несколько меньше, поэтому песчанистые отложения могут наблюдаться здесь только до глубины 8.5 м от НПУ. Соответственно илистые отложения должны занимать участки дна ниже указанных глубин.

Грунтовая съемка 1955 г. показала распределение грунтов в период, когда в результате самоочищения водоема от растительности значительная часть литорали оказалась доступной волновому воздействию в интервале глубин от 0 до 6 м, где интенсивная переработка первичного грунта обеспечивалась волнами, имеющими самую большую повторяемость. На глубинах больше 6 м до границы зоны аккумуляции илов, проходящей по 10-метровой изобате, о возможном переформировании грунтов можно судить только по отсутствию на поверхности почв наилка и частичному исчезновению дерновины.

Съемка 1965 г. подтвердила границу распространения илистых отложений на изобате 10 м. Песчанистые грунты продвинулись до глубины 7—8 м, а на глубинах 8—10 м появились явные признаки эрозии почв, выраженные размывом с образованием песчанистого наилка из пылеватого песка или песчанистого ила.

Направленность процесса образования вторичных грунтов, выявленная при сравнении материалов съемок, позволяет сделать вывод, что в будущем песчанистые отложения распространятся на весь диапазон глубин до границы зоны аккумуляции илов (Курдин, Зиминова, 1968б).

Морфометрические особенности Иваньковского и Угличского водохранилищ способствовали тому, что границы между отложениями в них стабилизировались быстрее, чем в Рыбинском водохранилище. Повторные грунтовые съемки этих водоемов не обнаружили существенных изменений в распределении грунтов, зафиксированном во время первых грунтовых съемок, проведенных на 18—20-м годах существования водохранилищ. По-видимому, этот срок был достаточен для установления стабильного положения границ между различными типами грунтов. Интересно отметить, что грунтовые съемки Новосибирского водохранилища, проведенные на 7-м и 14-м годах его существования, показали, что за этот промежуток времени произошло существенное увеличение площадей, занятых песчанистыми отложениями (Бейром и др., 1973), за счет главным образом сокращения площадей размываемых почв.

Можно считать, что общая направленность процессов формирования ложа одинакова во всех водохранилищах, а различия

в сроках установления окончательного пространственного распределения грунтов обусловлены морфометрическими и гидрологическими особенностями водоемов.

Одновременно с распространением песчанистых отложений в глубь водоемов происходят изменения в составе илистых отложений, обусловленные изменением соотношения алло- и автохтонных взвешенных веществ в водоеме. Поступление аллохтонных взвесей в водохранилища можно считать постоянным, так как существующие годовые вариации твердого стока, определяемые колебаниями речного стока, невелики и не в состоянии привести к изменениям в качественном составе грунтов, формируемых при его участии. Поступление автохтонного грунтообразующего материала, как указывалось при анализе компонентов баланса взвесей, не остается постоянным. На Рыбинском водохранилище значительное уменьшение количества взвесей, образующихся при его самоочищении от затопленной наземной растительности и при размыве торфяных сплавин, привело к обеднению грунтообразующего материала органическим веществом. Поскольку самоочищение и размыв сплавин наиболее характерны для Главного плёса, указанные изменения в составе взвесей отразились прежде всего на составе илистых отложений этого плёса, где происходит постепенное погребение торфянистого и переходного илов серым илом с меньшим содержанием органического вещества (Курдин, Зиминова, 1968а).

Окончание формирования мелководий и уменьшение интенсивности переработки берегов привели к обеднению взвесей минеральными частицами. Это отразилось на составе грунтов речных плёсов, в которых наблюдается относительное увеличение органического вещества в верхних горизонтах серого ила. Поступление взвешенного вещества за счет переформирования берегов и мелководий и в дальнейшем будет уменьшаться, поэтому изменения в грунтовом комплексе, вызванные этим процессом, необратимы.

Таким образом, перестройка грунтового комплекса Рыбинского водохранилища, подтвержденная материалами грунтовых съемок (1955 и 1965 гг.), выражается в погребении торфянистого и переходного илов Главного плёса серым илом с меньшим содержанием органического вещества, а в речных плёсах — в образовании илов, более богатых органическим веществом. В будущем грунтовый комплекс водохранилища в основном будет представлен серым илом и песками различной крупности. Эти типы грунтов займут соответственно 25 и 75% от площади дна водохранилища. Трансформированные грунты, особенно разбухшие и заболоченные почвы, сохранятся на очень небольших площадях, надежно изолированных от волнения, а обнаженные почвы будут, как и в настоящее время, сопрягать зоны размыва мелководий с зоной аккумуляции вторичных песков. Ширина пояса, занятого обнаженными почвами, определяется углами наклона мелководий, причем с увеличением углов наклона она уменьшается.

Учитывая изменения, происходящие в балансе взвешенных веществ Угличского и Иваньковского водохранилищ (возрастание относительной доли речных наносов и фитоплактона), можно полагать, что и в этих водоемах происходят изменения в составе грунтов, аналогичные наблюдающимся в речных плёсах Рыбинского водохранилища.

Основываясь на изменении интенсивности процессов седиментации и береговой абразии, В. М. Широков (1968) выделил два этапа в формировании ложа водоема: 1) становление подводного рельефа и интенсивная седиментация, 2) стабилизация и слабая седиментация. На наш взгляд, предлагаемая схема справедлива лишь частично. Нельзя не согласиться с наличием двух периодов — интенсивной и слабой седиментации. Однако нельзя отождествлять их с периодами становления и стабилизации. Само понятие «ложе водоема» включает в себя не только рельеф дна, но и всю совокупность грунтов, обладающих определенным комплексом физико-химических свойств. Исходя из этого, в период становления ложа должны происходить интенсивное формирование рельефа дна (строго говоря, его мезо- и микроформ, поскольку сам рельеф дна определяется рельефом затопленной суши) и образование характерного для водоема грунтового комплекса с определенными физическими и химическими показателями, который в дальнейшем (в период стабилизации) остается относительно постоянным, т. е. не испытывает каких-либо необратимых изменений под влиянием внешних факторов. Оба эти процесса — интенсивное формирование рельефа и устойчивого грунтового комплекса — значительно более растянуты во времени, чем период интенсивной седиментации. Само утверждение, что водоем вступает в фазу стабилизации после ослабления абразионной деятельности водной массы и снижения темпов седиментации, заключает в себе некоторое противоречие. Снижение темпов седиментации происходит в результате полного или частичного прекращения поступления взвесей из одного или нескольких основных источников грунтообразующего материала. В составе грунтов начинаются при этом необратимые изменения, которые тем значительнее, чем больше различия в составе взвесей, поступающих из разных источников. Происходит постепенная замена существующего грунтового комплекса на новый, состав грунтов которого соответствует новому набору источников грунтообразующего материала. Таким образом, вряд ли применимо к этому состоянию ложа водоема название «стабилизация».

Естественно, что вследствие низких темпов седиментации эта фаза периода становления более длительна. Так, на Рыбинском водохранилище после 30 лет его эксплуатации формирование рельефа дна закончилось примерно на 70% площади водоема и продолжается существенная перестройка грунтового комплекса, образовавшегося в фазу интенсивной седиментации. На Угличском водохранилище при средних за 1962—1968 гг. темпах

осадконакопления для образования полусантиметрового слоя отложений, отличающихся по составу от существующих, необходимо около 10 лет. Можно полагать, что грунтовый комплекс этого водоема достиг стадии стабилизации лишь к началу 70-х годов, т. е. примерно через 30 лет после создания водохранилища. На Иваньковском водохранилище эта стадия, по-видимому, была достигнута за более короткий промежуток времени (около 20 лет), так как здесь скорее завершилось формирование

Скопление древесных остатков, образовавшееся при самоочищении Рыбинского водохранилища от затопленного леса.

рельефа мелководий и определился постоянный состав взвешенных веществ, принимающих участие в образовании донных отложений.

В связи с изложенным вызывает сомнение утверждение, что ложе Камского водохранилища, на котором наблюдается интенсивная переработка берегов, после полутора десятков лет эксплуатации приближается к стадии стабилизации (Матарзин и др., 1968).

Таким образом, периодом становления ложа водохранилища мы называем период направленных и необратимых изменений в рельефе ложа, распределении грунтов и их составе. С. Л. Вендров (1970) предлагает называть этот период «периодом неустановившегося режима формирования берегов и дна водохранилищ».

С. Л. Вендров и В. А. Клюева (1972) отмечают, что на 20-й год существования Цимлянского водохранилища его глубоководная зона находится в стадии «неустановившегося

режима», и прогнозируют продолжительность этого периода в 40—50 лет. Многолетний опыт исследований верхневолжских водохранилищ показывает, что формирование устойчивого грунтового комплекса во вновь образованных водоемах продолжается в течение нескольких десятилетий и заканчивается при достижении равновесия между гидродинамической активностью водной массы и ложем и установлением постоянного состава взвешенных веществ, формирующих донные отложения.

Заключение

В исследованиях гидрологических процессов водохранилищ волжского каскада, проводимых лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР, наряду с изучением особенностей уровенного, скоростного и температурного режимов, основных факторов, влияющих на режимные характеристики, большое внимание уделяется изучению взвесей и условий формирования грунтового комплекса.

Большой материал, собранный по донным отложениям верхневолжских водохранилищ, его тщательная обработка позволили впервые широко осветить процесс осадкообразования, показать характер донных отложений и особенности их распределения в крупных искусственных водоемах.

Всестороннее изучение донных отложений одновременно на трех водохранилищах разного типа наряду с выявлением индивидуальных особенностей процесса формирования грунтового комплекса в каждом из них позволило установить ряд закономерностей, которые могут иметь общее значение и для других водоемов подобного типа.

На фоне особенностей гидрологического режима рассматриваемых водохранилищ получена количественная оценка источников грунтообразующего материала. Установлено, что в процессе формирования донных отложений искусственных водоемов, находящихся на ранних стадиях развития, важную роль играет абразионная деятельность водной массы. Количество материала, образующегося за счет размыва ложа водоема в крупных озеровидных водохранилищах и озеровидных участках долинных водохранилищ, соизмеримо с количеством вещества, поступающего в водоем при абразии берегов. Игнорирование фактора переработки ложа и отсутствие его количественных оценок вносят заметные искажения в представление о процессах осадкообразования в водохранилищах и могут привести к существенным погрешностям при расчетах осадконакопления.

Сток взвешенных наносов рек — второй по величине и наиболее стабильный во времени источник грунтообразующего материала. Роль биологического фактора в формировании донных отложений водохранилищ сравнительно невелика.

Бо́льшая часть взвешенного вещества, поступившего в водохранилища и образовавшегося в них, аккумулируется на дне водоемов, образуя вторичные донные отложения, которые являются основной составной частью грунтового комплекса верхневолжских водохранилищ. Кроме вторичных донных отложений, грунтовой комплекс этих водоемов включает первичные грунты (сохранившиеся после затопления незаиленные почвы и трансформированные грунты), почвы, подвергшиеся в условиях водохранилища существенным изменениям (заболачивающиеся, разбухшие, обнаженные). Состав грунтового комплекса всех исследованных водохранилищ одинаков. Различно лишь соотношение площадей, занимаемых перечисленными группами грунтов, так как условия формирования грунтового комплекса и доля участия отдельных грунтообразующих материалов в его формировании имеют свои особенности в каждом водоеме.

Распределение грунтов во всех верхневолжских водохранилищах характеризуется следующими основными закономерностями. На русловых участках преобладают пески различной крупности. В местах перехода русловых участков в долинные получают развитие песчаные серые и серые илы аллювиального происхождения. В озерных частях и в приплотинных участках водохранилищ преобладают илистые отложения. Резких границ между основными типами грунтов в водохранилищах не существует.

В зависимости от гидродинамической активности водных масс водохранилищ глубины, на которых начинают появляться иловые отложения, свидетельствующие об устойчивой седиментации взвесей, различны. В Иваньковском водохранилище верхней границей распределения илистых отложений в открытых частях водоема является глубина 5 м, в Угличском — 4, а в Главном плёсе Рыбинского водохранилища — 10 м.

Механический состав донных отложений верхневолжских водохранилищ характеризуется почти полным отсутствием частиц больше 0.5 мм. Исключение составляют отдельные участки в верховьях речных плёсов и мелководий, где сохраняются крупные пески. Обычно в одном и том же типе грунта в различных водохранилищах одноразмерные фракции содержатся примерно в равных количествах.

Содержание органического вещества в первичных грунтах — песчаных и супесчаных почвах — составляет от 3 до 30%, у торфа превышает 70%.

Результаты непосредственного зондирования толщи вторичных донных отложений позволяют определить средний годовой темп осадконакопления за три десятилетия их существования. Средняя высота слоя вторичных отложений составляет в Иваньковском водохранилище 0.20 см в год, в Угличском — 0.17, в Рыбинском — 0.25 см в год, а вес отложений соответственно 1.5, 1.1 и 0.9 тыс. т на 1 км^2 дна в год. Следует отметить, что приведенные показатели — средние для водоема в целом. Специфика процесса седи-

ментации заключается в резкой дифференциации ее темпов по районам и глубинам водоемов в зависимости от вида и степени гидродинамической активности водной массы. Достаточно сказать, что средняя величина годового слоя отложений в Иваньковском водохранилище колеблется по различным участкам и глубинам от 0 до 1.9 см в год, в Угличском — от 0 до 1.1, в Рыбинском — от 0 до 6.0 см в год. В каждом случае средний годовой темп седиментации на различных участках водохранилищ обусловлен преобладающими в многолетнем плане видом и степенью гидродинамической активности.

В целом темпы седиментации в верхневолжских водохранилищах низки и исключают существование проблемы заиления этих водоемов. Однако процесс формирования качественно нового дна имеет огромное значение в жизни населяющих водоемы организмов. Количественная оценка компонентов баланса взвешенных веществ и анализ их временных изменений в совокупности с материалами повторных грунтовых съемок позволили установить, что при наличии временных изменений в гидродинамической активности водной массы и полном или частичном сокращении поступления грунтообразующего материала из одного или нескольких его основных источников происходят необратимые изменения в грунтовом комплексе. В результате таких изменений продолжительность периода становления устойчивого грунтового комплекса составила в Иваньковском водохранилище около 20 лет, в Угличском — 30 лет. В Рыбинском водохранилище после 30 лет его эксплуатации продолжается существенная перестройка грунтового комплекса, сформировавшегося в первое десятилетие его существования.

Литература

Авакян А. Б., Шарапов В. А. 1968. Водохранилища гидростанций СССР. Изд. 2-е. Госэнергоиздат, М.—Л.

Аринушкина Е. В. 1961. Руководство по химическому анализу почв. Изд. МГУ, М.

Афанасьева Е. А. 1940. Почвы нижней части долины реки Мологи и прилегающих частей Молого-Шекснинской низины. Матер. по изуч. почв речных долин подзолистой зоны европейской части СССР. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, т. 15, с. 17—154.

Бейром С. Г., Вострякова Н. В., Широков В. М. 1973. Изменения природных условий в Средней Оби после создания Новосибирской ГЭС. «Наука», Новосибирск.

Белавская А. П., Кутова Т. Н. 1966. Растительность зоны временного затопления Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (4), с. 162—189.

Белых Ф. И. 1959. О методе расчета среднего уровня Рыбинского водохранилища. — Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 1. Гидрометеоиздат, М., с. 25—50.

Белых Ф. И. 1965. Расчет водообмена Рыбинского водохранилища с окружающим его грунтовым бассейном. — Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 2. Гидрометеоиздат, М., с. 3—19.

Бруевич С. В. 1944. Некоторые методы химического исследования грунтов и грунтовых растворов моря. Гидрометеоиздат, М.—Свердловск.

Буторин Н. В. 1959. К вопросу о проточности Иваньковского и Угличского водохранилищ. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 3, «Наука», Л., с. 38—40.

Буторин Н. В. 1963а. Гидрологические условия Куйбышевского водохранилища в период заполнения. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), с. 278—302.

Буторин Н. В. 1963б. Уровень Рыбинского водохранилища и его колебания (1948—1960 гг.). — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), с. 303—321.

Буторин Н. В. 1969. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада. «Наука», Л.

Буторин Н. В., Курдина Т. Н. 1975. Особенности температурного режима Иваньковского водохранилища в условиях искусственного подогрева. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 27 (30).

Буторин Н. В., Литвинов А. С. 1963. О течениях в Рыбинском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6 (9), с. 270—302.

Буторин Н. В., Литвинов А. С. 1968. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище. — В кн.: Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. «Наука», М.—Л., с. 250—258.

Буторин Н. В., Смирнов Н. П. 1968. Исследование водных масс континентальных водоемов статистическим методом с использованием ЭВМ. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (21), с. 89—99.

Буторина Л. Г. 1961. Фитопланктон Иваньковского водохранилища в 1954—1956 гг. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 4 (7), с. 20—33.

Буторина Л. Г. 1966. Фитопланктон Угличского водохранилища в 1954—1956 гг. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14), с. 36—42.

Вендров С. Л. 1955. О динамике береговой зоны Цимлянского водохранилища. — Изв. АН СССР, сер. геогр., № 5, с. 16—29.

Вендров С. Л. 1970. Проблемы преобразования речных систем. Гидрометеоиздат, Л.

Вендров С. Л., Клюева В. А. 1972. Деформации берегов и дна Цимлянского водохранилища за двадцать лет. — Геоморфол., № 4, с. 26—31.

Вендров С. Л., Стеженская И. Н. 1969. О масштабах и характере процессов заносимости при формировании берегов и дна крупных водохранилищ на равнинах и предгорьях. — Тр. Совещ. по изуч. берегов водохранилищ и вопросов дренажа в условиях Сибири, Новосибирск, с. 26—38.

Винберг Г. Г., Шушкина Э. А., Печень Г. А. 1965. Продукция планктонных ракообразных в 3 озерах разного типа. — Зоол. журн., т. 44, вып. 5, с. 676—687.

Виноградова Н. Н. 1969. Формирование и распределение грунтов дна Можайского водохранилища. — Вестн. Моск. гос. ун-та, сер. геогр., № 6, с. 37—40.

Виноградова Н. Н., Эдельштейн К. К. 1971. К характеристике взвесей и грунтов Горьковского водохранилища.— В кн.: Комплексные исследования водохранилищ, вып. 1. Изд. МГУ, с. 112—121.

Владимирова Т. М. 1974. Продукция зоопланктона Рыбинского водохранилища. — В кн.: Биология и продуктивность пресноводных беспозвоночных. «Наука», Л.

Гавеман А. В. 1955. Московское море. Изд. 2 (дополненное и переработанное). Калинин.

Грабовская О. А. 1940. Почвы нижнего течения долины р. Шексны и прилегающей части Молого-Шекснинской низины. Матер. по изуч. почв речных долин подзолистой зоны европейской части СССР. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, т. 15, с. 155—300.

Гусева К. А., Экзерцев В. А. 1966. Формирование фитопланктона и высшей водной растительности в равнинных водохранилищах. — В кн.: Экология водных организмов. «Наука», М., с. 92—98.

Гущин В. Ф. 1968. Характеристика некоторых косвенных показателей воднобалансового режима Верхне-Волжских водохранилищ. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 4. Гидрометеоиздат, Л., с. 38—50.

Гущина Л. А. 1966. Ветровой режим Рыбинского водохранилища. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 3. Гидрометеоиздат, Л., с. 109—159.

Дегтяревский В. К. 1958. Физико-географическое районирование Ярославской обл. — Уч. зап. Ярославского гос. пед. ин-та, вып. XX, ч. 2, с. 131—152.

Драчев С. М. 1971. Химический состав донных отложений и затопленных почв. — В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. «Наука», Л., с. 3—7.

Драчев С. М., Кудрявцева Н. А. 1974. О химическом составе донных отложений Иваньковского водохранилища. — В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск, с. 102—110.

Ершова М. Г. 1968. Водные массы Череповецкого водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19), с. 3—21.

Живаго А. В. 1951. Основные закономерности развития берегов Рыбинского водохранилища. — Изв. АН СССР, сер. геогр., № 4, с. 16—26.

Живаго А. В. 1954. Современные геоморфологические процессы на берегах Кубенского озера и Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та океанол. АН СССР, вып. 10, с. 92—108.

Зенин А. А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Гидрометеоиздат, Л.

Зиминова Н. А. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Иваньковского водохранилища в 1951—1956 гг. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), с. 212—228.

Зиминова Н. А. 1963. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6 (9), с. 230—249.

Зиминова Н. А. 1965. Состав взвесей Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), с. 100—111.

Зиминова Н. А., Григорьева Е. Р. 1974. Поступление аллохтонного органического вещества в Иваньковское водохранилище. — Биол. внутр. вод. Информ. бюлл., № 24, с. 54—58.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1968а. Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (21), с. 142—151.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1968б. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19), с. 56—71.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1970. Влияние Иваньковского водохранилища на режим стока взвешенных наносов Волги. — Матер. межвузовской научн. конф. по вопр. изучения влияния водохранилищ на природу и хозяйство окружающих территорий, Калинин, с. 119—121.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1971а. Сток взвешенных наносов притоков Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20(23), с. 123—130.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1971б. Объемный вес донных отложений Рыбинского водохранилища. В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23), с. 137—142.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1972а. Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23 (26), с. 199—210.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1972б. Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23 (26), с. 211—220.

Зиминова Н. А., Курдин В. П. 1974. Баланс взвешенных веществ в Иваньковском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 26 (29), с. 89—94.

Зиминова Н. А., Трифонова Н. А. 1963. Состав и седиментация взвесей в Рыбинском водохранилище в зимний период. — Матер.

по биол. и гидрол. волжских водохр., Изд-во АН СССР, М.—Л., с. 117—118.

Иванов А. А. 1948. О волнах в мелководных водоемах. — Тр. Морск. гидрофиз. ин-та, т. 1, с. 5—11.

Иванов В. С. 1965. Прогноз переформирования берегов Рыбинского водохранилища. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 2. Гидрометеоиздат, Л., с. 33—60.

Иванов Ю. Н. 1962. Исследование грунтов Кайраккумского водохранилища. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 98, с. 182—202.

Казаков Е. И., Пронина М. В. 1941. Химический состав различных форм планктона и бентоса. — Тр. Лаб. генезиса сапропеля АН СССР, вып. 2, с. 49—52.

Кленова М. В. 1945. Процессы осадкообразования в полярных морях. — Докл. Юбилейной сессии Аркт. ин-та. Изд. ГУСМП, М.—Л.

Колкутин В. И. 1966. Водный баланс Угличского водохранилища. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 3. Гидрометеоиздат, Л., с. 39—49.

Кондратьев Н. Е. 1960. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. Гидрометеоиздат, Л.

Корелякова И. Л. 1958. Некоторые наблюдения над распадом перезимовавшей прибрежно-водной растительности Рыбинского водохранилища. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 1, с. 22—25.

Кренке А. Н. 1958. Материалы по течениям Рыбинского водохранилища. — Тр. биол. ст. «Борок», вып. 3, с. 20—34.

Кудрявцев Д. Д. 1950. Физико-химические свойства донных (иловых) отложений Волжского отрога Рыбинского водохранилища. — Тр. биол. ст. «Борок», вып. 1, с. 97—104.

Кузнецов С. И. 1955. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в водоемах. Изд-во АН СССР, М.

Кузнецов С. И. 1970. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. «Наука», Л.

Кузнецов С. И., Карпова Н. С. 1966. Динамика численности бактерий в Рыбинском водохранилище в 1961 и 1962 гг. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16), с. 117—122.

Кузнецов С. И., Романенко В. И., Карпова Н. С. 1966. Численность бактерий и продукция органического вещества в водной массе Рыбинского водохранилища в 1963 и 1964 гг. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16), с. 123—132.

Кузнецов С. И., Романенко В. И., Карпова Н. С. 1967. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1965 г. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (18), с. 17—25.

Кузнецов С. И., Романенко В. И., Карпова Н. С., Романенко В. А. 1971а. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1966 г. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 21 (24), с. 17—22.

Кузнецов С. И., Романенко В. И., Карпова Н. С., Романенко В. А. 1971б. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1967 г. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 21 (24), с. 23—30.

Кузнецов С. И., Сперанская Т. А., Коншин В. Д. 1939. Состав органического вещества в иловых отложениях различных озер. — Тр. Лимнол. ст. в Косине, т. 22, с. 75—102.

Курдин В. П. 1959. Классификация и распределение грунтов Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4), с. 25—37.

Курдин В. П. 1960а. Грунты Белого озера. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 3 (6), с. 301—306.

Курдин В. П. 1960б. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 8—9, с. 57—61.
Курдин В. П. 1961а. Грунты Иваньковского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 4 (7), с. 328—346.
Курдин В. П. 1961б. Основные положения о процессах образования и распределения грунтов в верхневолжских водохранилищах. — Тр. Совещ. Ихтиол. комиссии АН СССР, вып. 10, с. 53—60.
Курдин В. П. 1963. Условия формирования грунтового комплекса Угличского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), с. 322—328.
Курдин В. П. 1965. Формирование рельефа и грунтов банок расширенной части Волжского плёса Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), с. 112—118.
Курдин В. П., Зиминова Н. А. 1968а. Изменение количества органического вещества в илистых отложениях Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19), с. 87—91.
Курдин В. П., Зиминова Н. А. 1968б. Об изменениях в грунтовом комплексе Рыбинского водохранилища. — Биол. внутр. вод. Информ. бюлл., № 2, с. 38—40.
Курдин В. П., Зиминова Н. А. 1971а. К определению стока взвешенных веществ из Рыбинского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23), с. 131—136.
Курдин В. П., Зиминова Н. А. 1971б. Пути формирования грунтового комплекса Рыбинского водохранилища. — В кн.: Комплексные исследования водохранилищ, вып. 1. Изд. МГУ, с. 104—111.
Курдин В. П., Зиминова Н. А. 1972. О наносоудерживающей способности Угличского водохранилища. — В кн.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. «Наука», Л., с. 221—225.
Курдина Т. Н. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), с. 229—245.
Лебедев В. В. 1955. Гидрология и гидрометрия в задачах. Гидрометеоиздат, Л.
Леонтьев О. К., Бахтина М. Е., Добрынина Т. А. 1959. Механический состав наносов как индикатор динамики береговой зоны северо-западного побережья Каспия. — Вест. МГУ, сер. биол., почвов., геол., геогр., № 1, с. 53—60.
Лилиенберг Д. А., Сетунская Л. Е., Благоволин Н. С., Горелов С. К., Никонов А. А., Розанов Л. Л., Серебряный Л. Р., Филькин В. А. 1972. Морфоструктурный анализ современных вертикальных движений европейской части СССР. — Геоморфол., № 1, с. 3—18.
Литвинов А. С. 1966. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 3. Гидрометеоиздат, Л., с. 50—60.
Литвинов А. С. 1968. О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС. — Биол. внутр. вод. Информ. бюлл., № 2, с. 26—30.
Лопатин Г. В. 1952. Наносы рек СССР. Географгиз, М.
Луферова Л. А., Монаков А. В. 1966. Зоопланктон Рыбинского водохранилища в 1956—1963 гг. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 12 (15), с. 40—55.
Матарзин Ю. М., Мацкевич И. К., Сорокина Н. Б. 1968. О формировании рельефа дна Камских водохранилищ. — Уч. зап. Пермского гос. ун-та, Гидрол. и метеорол., вып. 3, с. 92—111.
Матвеев В. П. 1950. Рыбинское водохранилище. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 7, с. 3—28.

Мордухай-Болтовской Ф. Д. 1955. Распределение бентоса в Рыбинском водохранилище. — Тр. биол. ст. «Борок», вып. 2, с. 32—88.
Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. 1957. Вып. 6, ч. 1. Гидрометеоиздат, Л.
Овчинников И. Ф. 1950. Краткий очерк Рыбинского водохранилища. — Тр. биол. ст. «Борок», вып. 1, с. 105—138.
Петухова Г. А. 1966. Зависимость объемного веса донных отложений от их гранулометрического состава. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 132, с. 82—90.
Потапов А. А. 1954. Распределение водных растений в заливах Иваньковского и Истринского водохранилищ в зависимости от различий химического состава воды и донных отложений. — В кн.: Строительство водохранилищ и проблема малярии. М., с. 40—64.
Практические рекомендации по расчету заиления водохранилищ. 1966. Изд. ГГИ, Л.
Пырина И. Л. 1966. Первичная продукция фитопланктона в Иваньковском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16), с. 249—269.
Ресурсы поверхностных вод СССР. 1967. Основные гидрологические характеристики. Т. 10. Верхневолжский район. Гидрометеоиздат, Л.
Романенко В. И. 1966. Характеристика микробиологических процессов образования и разрушения органического вещества в Рыбинском водохранилище. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16), с. 133—153.
Романенко В. И. 1967. Сравнение кислородного и радиоуглеродного методов определения интенсивности фотосинтеза фитопланктона. — Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (18), с. 54—60.
Россолимо Л .Л. 1934. Задачи и установки лимнологии как науки. — Тр. Лимнол. ст. в Косине, вып. 17, с. 5—20.
Россолимо Л. Л. 1950. Некоторые данные по илонакоплению в Иваньковском водохранилище (Московское море) системы канала им. Москвы. — Тр. Всесоюзн. гидробиол. о-ва, т. 2, с. 30—38.
Россолимо Л. Л. 1964. Основы типизации озер и лимнологического районирования. — В кн.: Накопление вещества в озерах. «Наука», М., с. 5—46.
Рутковский В. И., Курдина Т. Н. 1959. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955 г. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4), с. 5—24.
Рыбинское водохранилище и его жизнь. 1972. «Наука», Л.
Селюк Е. М. 1959. Расчет высоты волны и задачи натурных исследований волнения на водохранилищах. — Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. 4. Гидрометеоиздат, Л., с. 89—96.
Селюк Е. М. 1961. Исследования, расчеты и прогнозы ветрового волнения на водохранилищах. Гидрометеоиздат, Л.
Семенович Н. И. 1966. Донные отложения Ладожского озера. «Наука», М.—Л.
Семенович Н. И. 1973. Донные отложения Онежского озера. «Наука», Л.
Синайская Т. М., Иванов А. В. 1973. Автохтонные наносы Киевского водохранилища. — Гидробиол. ж., т. 9, № 4, с. 56—62.
Скопинцев Б. А. 1947. О скорости разложения органического вещества отмершего планктона. — ДАН СССР, т. 58, № 8, с. 1797—1800.
Соколова Г. А., Сорокин Ю. И. 1957. Бактериальное восстановление сульфатов в илах Рыбинского водохранилища .— Микробиол., т. 26, вып. 2, с. 194—201.
Сорокин Ю. И. 1958а. Микрофлора и химический состав грунтов Рыбинского водохранилища. — Тр. биол. ст. «Борок», вып. 3, с. 89—111.

Сорокин Ю. И. 1958б. Первичная продукция органического вещества в водной толще Рыбинского водохранилища. — Тр. биол. ст. «Борок» АН СССР, вып. 3, с. 66—88.
Сорокин Ю. И. 1959. Биомасса бактерий и химический состав грунтов Рыбинского водохранилища. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 4, с. 3—6.
Сорокин Ю. И. 1961. Продукция фотосинтеза в волжских водохранилищах в конце июня 1959 г. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 11, с. 3—6.
Сперанская Т. А. 1935. Данные по изучению органического вещества иловых озерных отложений. — Тр. Лимнол. ст. в Косине, т. 20, с. 67—78.
Справочник по водным ресурсам. 1975. Т. 10.
Страхов Н. М. и др. 1954. Образование осадков в современных водоемах. Изд-во АН СССР, М.
Тачалов С. Н. 1959. Термический режим Рыбинского водохранилища. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 1. Гидрометеоиздат, Л., с. 106—130.
Тачалов С. Н. 1965. Динамика изменения затопленной древесной растительности и торфяных сплавин на Рыбинском водохранилище. — Сб. работ Рыбинской ГМО, вып. 2. Гидрометеоиздат, Л., с. 115—122.
Трифонова Н. А. 1967. О накоплении соединений азота в донных отложениях Рыбинского водохранилища. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. «Наука», М., с. 118—123.
Трифонова Н. А. 1974. Содержание и выделение соединений азота донными отложениями Рыбинского водохранилища. — В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск.
Тюрин И. В. 1934. К вопросу о методике изучения органического вещества почвы в биохимическом отношении. — Тр. Почвенного ин-та им. Докучаева, т. 10, вып. 4, с. 27—38.
Фортунатов М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. — Тр. Ин-та биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), с. 246—352.
Шамов Г. И. 1939. Заиление водохранилищ. Гидрометеоиздат, М.—Л.
Шамов Г. И. 1959. Речные наносы. Гидрометеоиздат, Л.
Широков В. М. 1963. К вопросу изучения динамики подводного рельефа Куйбышевского водохранилища. — Матер. I научн.-техн. совещ. по изуч. Куйбышевского водохр., вып. 4, Куйбышев, с. 141—156.
Широков В. М. 1968. Современные донные отложения крупных водохранилищ долинного типа в период становления. — Тр. Сиб. научно-исслед. ин-та энергетики, вып. 14, с. 136—151.
Широков В. М. 1969. Влияние процесса обрушения берегов на заиление крупных водохранилищ. — Тр. Совещ. по изуч. берегов водохранилищ и вопросов дренажа в условиях Сибири, Новосибирск, с. 267—281.
Шраг В. И. 1953. Опыт классификации пойменных почв. — Почвоведение, № 11, с. 64—85.
Шушкина Э. А., Печень Г. А. 1964. Рационы питания и усвоение пищи хищными циклопами и *Daphnia longispina*, определенные радиоуглеродным методом. — В кн.: Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики. Минск.
Эдельштейн К. К. 1961. О влиянии уровня Рыбинского водохранилища на стоковые течения Моложского плёса. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 11, с. 61—64.
Экзерцев В. А. 1958. Продукция прибрежно-водной растительности Иваньковского водохранилища. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 1, с. 19—21.
Экзерцев В. А. 1973. Изменения в зарастании и продукции водной растительности Угличского водохранилища. — Биол. внутр. вод. Информ. бюлл., № 18, с. 25—27.

Экзерцова В. В. 1961. Продукция прибрежно-водной растительности Угличского водохранилища. — Бюлл. Ин-та биол. водохр. АН СССР, № 11, с. 6—9.
Яковлева Л. В. 1960. Механический состав и плотность донных отложений малых водоемов Центрально-Черноземных областей. — Тр. Лаб. озероведения АН СССР, т. 10, с. 167—192.
Яковлева Л. В. 1965. Характеристика заиленности малых водоемов Центрально-Черноземных областей и расчеты плотности донных отложений. — В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ Черноземного центра РСФСР. «Наука», М.—Л., с. 184—198.
Ярославцев Н. А., Шмелева Е. А. 1969. Исследование и расчет мутности воды Горьковского водохранилища. — Сб. работ Горьковской и Волжской ГМО, вып. 6. Гидрометеоиздат, Л., с. 55—71.
Heinemann H. 1962. Volume-weigt of reservoir sediment. — J. hydraul. div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., v. 88, № 5, c. 181—197.
Więckowski K. 1963. Preliminary results of examinations of bottom deposits in the Large Masurian Lakes. — Bull. Acad. polon sci., ser. sci. geol. et geogr., v. 11, № 2.

Contents

Page

Preface 3

Chapter I. Peculiarities of hydrological regime of the upper Volga reservoirs 5
- Geographical position, morphological and morphometrical peculiarities of reservoirs 5
- Characteristics of water feeding and water balance 10
- Regime of level 14
- Wave 17
- Currents 21
- Temperature of water 37
- Chemical characteristics of water 38

Chapter II. Material and Methods 40

Chapter III. Sources of ground forming material 47
- River sediment discharge 48
- Bank and bottom abrasion 56
- Production of phytoplankton and higher aquatics 63

Chapter IV. General characteristics and classification of bottom deposits 67

Chapter V. Distribution of botton deposits in reservoirs 76

Chapter VI. Some physical and chemical features of bottom deposits 85
- Mechanical composition 85
- Chemical composition 95
- Volume weight 107

Chapter VII. Characteristics of sedimentation process in reservoirs 112
- Accumulation of bottom sediments 112
- Sediment balance 128
- Stages of reservoirs bottom formation 138

Conclusion 146

Literature cited 149