

С. А. Поддубный, Э. В. Сухова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ГИДРОБИОНТОВ
В ВОДОХРАНИЛИЩАХ**

Российская академия наук
Институт биологии внутренних вод
им. И. Д. Папанина

С. А. Поддубный, Э. В. Сухова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ГИДРОБИОНТОВ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Руководство для пользователей



Рыбинск, 2002

*Публикация книги и подготовка рукописи к печати
выполнены при финансовой поддержке РФФИ,
проект № 01-05-64681.*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук В. П. Щербаков;

доктор географических наук А. С. Литвинов.

Поддубный С. А., Сухова Э. В.

П 44 Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах: Руководство для пользователей. — Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати», 2002.—120 с. Библ. 111 назв. Ил. 25. Табл. 10.

Книга содержит подробное описание комплекса программ для моделирования воздействия гидродинамических и антропогенных факторов на биотическое звено экосистем водохранилищ. Детально излагаются особенности моделей, их структура, организация работы в программном комплексе, подготовка исходных данных и оформление результатов расчетов. Уделено внимание верификации моделей, их практическому использованию с интерпретацией результатов вычислений.

Книга может быть полезна специалистам в области проектирования и эксплуатации водохранилищ, экологам, географам, гидробиологам, специалистам рыбного хозяйства, студентам и аспирантам гидрологических и гидротехнических специальностей.

Poddubnyi S. A., Sukhova E. V.

Modelling the effect of hydrodynamical and anthropogenic factors on distribution of hydrobionts in reservoirs (User's Manual).

The book includes a detailed description of a package of program for modelling the effect of hydrodynamical and anthropogenic factors on biotic component in reservoirs' ecosystems. The peculiar features of models, their structure, organization of the work in the program complex, preparation of initial data and results of calculations are presented. The attention is paid to verification of the models, their practical use with interpretation of the results of calculation.

The book will be of great importance to specialists engaged in design and operation of reservoirs, ecologists, geographers, hydrobiologist, specialists of fish industry, students and post-graduate students of hydrological and hydrotechnical specialties.

Предисловие

В книге приводится подробное описание комплекса программ, используемых для моделирования гидродинамических процессов в водохранилищах, расчета воздействия динамики вод на распределение живых организмов, а также моделирования распространения взвешенных веществ и сточных вод, оказывающих непосредственное антропогенное влияние на состояние водной экосистемы. Комплекс программ создавался в лаборатории гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН на основе подходов и методов, широко используемых в практике гидрологических, гидротехнических и гидробиологических исследований. В свою очередь, в процессе работы были предложены оригинальные подходы и методы оценки воздействия гидрологических процессов на условия обитания гидробионтов, нашедшие применение в ряде моделей программного комплекса.

Разработка моделей программного комплекса и их верификация на водохранилищах Волжского каскада и озерах бассейна Верхней Волги осуществлялась в рамках плановых программ научных исследований ИБВВ РАН, ФЦП «Возрождение Волги» и программ инициативных проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований в 1986—2002 гг. Издание книги стало возможным благодаря финансовой поддержке РФФИ (проект 01—05—64681).

Создание книги преследовало следующие цели:

- свести в единый комплекс накопленные за многолетний период разнообразные модели гидродинамических процессов и их воздействия на распределение гидробионтов в мелководной и глубоководной зонах озер и водохранилищ;
- создать практическое руководство по использованию программного комплекса для оценки гидродинамического и антропогенного влияния на биотическое звено экосистем водохранилищ;
- показать возможности использования моделей при решении теоретических и прикладных задач гидробиологических исследований.

В связи с этим, особенность этой книги заключается в детальном описании и изложении подробных инструкций по использованию отдельных моделей программного комплекса, примеров расчета гидродинамических характеристик и интерпретации результатов моделирования воздействия динамики вод на распределение и условия обитания живых организмов.

Книга состоит из 4 глав. В первой главе приводится краткое изложение современных представлений о гидродинамическом и антропогенном воздействии на биоту внутренних водоемов, моделировании влияния абиотических факторов на условия жизнедеятельности гидробионтов. Во второй главе сформулировано назначение моделей программного комплекса. Особое внимание уделено выбору, верификации и ограничениям моделей. Приведены основные уравнения, начальные и граничные условия. В третьей главе представлена организация работы в программ-

ном комплексе. Подробно описаны алгоритмы расчетов и работа программ. Даны инструкции по подготовке файлов исходных данных и показана организация выдачи результатов расчетов. В четвертой, заключительной, главе приводятся иллюстрации практического использования отдельных блоков программного комплекса. Дана краткая характеристика ряда регрессионных моделей распределения гидробионтов под действием динамики вод.

Читатели, желающие получить дополнительную информацию о моделях программного комплекса и условиях приобретения алгоритмов и программ могут обратиться по адресу: 152742, Ярославская область, Некоузский район, п. Борок, ИБВВ РАН. Отклики и замечания по предлагаемой читателям книге будут с признательностью приняты авторами.

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору физико-математических наук В. П. Щербакову, доктору технических наук А. Е. Асарину, доктору географических наук А. С. Литвинову и научному сотруднику ИБВВ РАН К. А. Подгорному за ценные советы при подготовке рукописи, а также М. А. Беляковой за помощь в подготовке рукописи к изданию.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ И АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭКОСИСТЕМЫ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ — СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Динамика вод и живые организмы

В озерах и водохранилищах из всей совокупности абиотических факторов водной среды, обуславливающих пространственное распределение гидробионтов, динамика водных масс играет существенную, а порой и определяющую роль. Следует сказать, что основная информация по этому вопросу относится к разнотипным озерам и практически отсутствует для водохранилищ.

В прибрежной зоне озер и крупных водохранилищ наибольшее механическое воздействие на живые организмы оказывает ветровое волнение. Исчерпывающие данные по влиянию ветрового волнения на различные группы высших водных растений и биоценозы зообентоса приведены в статьях [11, 65] и монографии «Роль волнения в формировании биоценозов бентоса больших озер» [70] для разнотипных озер Северо-Запада России. В этих работах количественно и качественно оценена роль волнения как лимитирующего, так и оптимизирующего фактора в развитии и распределении бентических организмов в пределах открытой и в различной степени защищенной литорали, а также показана возможность прогнозирования формирования экосистемы вновь создаваемых водохранилищ в районах, подверженных волнению.

В глубоководной зоне озер и водохранилищ влияние гидродинамических факторов на распределение и условия жизнедеятельности гидробионтов более разнообразно. Рядом исследователей с конца 1960-х годов до настоящего времени показано, что в зонах трансформации и смещения различных водных масс — участках с повышенной гидродинамической активностью, где происходит интенсификация физико-химических и биохимических процессов — наблюдается повышение биомассы и численности планктонных организмов и плотности рыб [4, 22, 38, 99, 100].

Формирующаяся под воздействием внешних факторов крупномасштабная циркуляция воды оказывает определяющее влияние на распределение планктона в безледный период. В обширных по площади озерах и главных плесах водохранилищ стогно-нагонные явления, возникающие при действии продолжительных ветров, способствуют накоплению фитопланктона у наветренного берега, в бухтах и заливах [9]. В центральных плесах водохранилищ в районах с интенсивным однонаправленным переносом вод наблюдается наименьшее содержание планктона. При завихрении и ослаблении скорости потока плотность скоплений постепенно увеличивается, причем в

центрах антициклонических вихрей отмечается тенденция увеличения биомассы планктона с постепенным уменьшением последней к периферии круговоротов. В центрах циклонических вихрей наблюдается уменьшение биомассы планктона с ее постепенным увеличением к периферии круговоротов. Кроме того, наибольшие скопления планктонных организмов тяготеют к зонам расхождения потоков воды, характеризующимся наименьшими скоростями интегрального переноса [56].

Исследования показали, что водоросли очень чувствительны к изменению ветра, коэффициенту трения на поверхности воды, коэффициенту вязкости воды [101], а их перемещение характеризуется вращательно-поступательным движением, вызванным вертикальным сдвигом скорости течения [9].

Поскольку распределение планктонных водорослей во многом зависит от динамики вод водоема, появляется возможность по гидрометеорологическим данным проводить коррекцию результатов полевых измерений с целью получения представления о местах максимальных и минимальных скоплений водорослей [34, 82, 83]. Не менее важной является возможность решения обратной задачи — прогнозирование местонахождения скоплений водорослей на тех или иных участках водоема по изменению (фактическому или прогнозируемому) гидрометеорологических факторов, что было сделано указанными авторами для днепровских водохранилищ.

Распределение сообществ планктонных животных в водоемах определяется не только характером течений, но и особенностями биологии самих организмов. Так, в Рыбинском водохранилище относительное постоянство районов с высокой биомассой зоопланктона, несмотря на значительную подвижность водной массы в летний период, может быть связано с особенностями горизонтальной циркуляции вод (наличие двухслойной структуры течения) и с суточной вертикальной миграцией планктона [6, 67]. В небольших озерах как в отсутствие, так и при наличии термической стратификации в условиях продолжительного продольного ветрового воздействия образуется циркуляция воды в вертикальной плоскости, приводящая к горизонтальному перераспределению планктона. Планктеры, обладающие положительной плавучестью, переносятся поверхностным течением, концентрируются у наветренного берега и постепенно опускаются в придонные слои нисходящими потоками воды, а организмы с отрицательной плавучестью восходящими потоками воды выносятся у подветренного берега в поверхностные слои [103, 108, 109].

Течения как элемент гидрологического режима внутренних водоемов и фактор среды обитания гидробионтов оказывают непосредственное воздействие на поведение особей и групп рыб, использующих направление и скорость потоков воды при перемещении в конкретных ситуациях [51, 52]. В разнотипных озерах и водохранилищах пространственное перемещение и распределение рыб обуславливается сгонно-нагонными явлениями, приводящими к накоплению рыб у наветренного берега водо-

ема, и общей циркуляцией воды, способствующей локализации скоплений пелагических рыб в наиболее оптимальных для жизнедеятельности районах — зонах пониженных скоростей течения воды в центрах круговоротов и между вихревыми образованиями [44].

Существенные результаты достигнуты Д. С. Павловым и его коллегами по изучению поведения молоди рыб в потоке воды. На основании данных натурных наблюдений на реках и водохранилищах, подкрепленных результатами лабораторных экспериментов, выявлены особенности распределения молоди пелагических рыб разных экологических групп при различной гидравлической структуре потока и определены значения избираемых рыбами скоростей течения [47]. Дальнейшие исследования показали значительное влияние пульсаций скорости течения на поведение и распределение молоди рыб в потоке воды [76]. Так, плотва, выловленная из непроточного залива Иваньковского водохранилища и помещенная в условия турбулентного потока, уходила в зону с меньшими скоростями течения и меньшими их пульсациями. С другой стороны, плотва, обитавшая в р. Волге, предпочитала зоны потока с большой турбулентностью. В условиях сильно турбулентного речного потока (излучины рек) распределение молоди рыб обуславливается возникающей поперечной циркуляцией воды. Перемещение зоны максимального содержания рыб в единице объема воды от входа в излучину к ее вершине и далее — к выходу в целом соответствует винтовой линии [92].

В заключение отметим достаточно важную роль вертикального перемешивания водной толщи в распределении и формировании оптимальных условий жизнедеятельности водных организмов. Турбулентное перемешивание, вызываемое ветром, внутренними волнами и апвеллингом, способствует изменению скорости фотосинтеза, непериодическому всплеску численности и биомассы фитопланктона в неглубоких озерах и водохранилищах, изменению структуры сообществ планктона, формированию кормовой базы и нагульных скоплений рыб в прибрежной и глубоководной зоне крупных глубоких озер [26, 31, 96, 106]. Волновое перемешивание оказывает значительное воздействие и на распределение пелагических рыб. В периоды штиля скопления рыб характеризуются пространственной неравномерностью. При продолжительном и интенсивном ветровом волнении распределение рыб становится более равномерным [81]. Избегая неблагоприятного воздействия волнения, рыбы из поверхностных слоев уходят в средние и придонные слои воды [37].

1.2. Антропогенное воздействие на водные экосистемы

Под антропогенным воздействием на водные экосистемы, прежде всего, мы понимаем загрязнение природных вод в результате хозяйственной деятельности человека. Другим важным проявлением антропогенного влияния на экосистемы водохранилищ, не рассматриваемого подробно

в данной работе, является сезонное изменение уровня воды, приводящее к нарушениям условий жизнедеятельности мелководных сообществ гидробионтов. Источники загрязнения водных объектов чрезвычайно многообразны. Можно выделить следующие типы загрязнения водоемов.

Химическое, или загрязнение растворимыми веществами, подразумевает сброс в водоем сточных и ливневых вод с территорий городов через коллекторы сточных вод, поступление поллютантов с сельскохозяйственных угодий и выпадение сухих и мокрых осадков из атмосферы на зеркало водоемов и поверхность водосборных бассейнов. Так, в 1991 г. сброс сточных вод в водоемы России составил $73,2 \text{ км}^3$ или около 4% от глобального объема сточных вод (1800 км^3). Причем, 58% объема сточных вод характеризовались как нормативно-чистые, 4% — как нормативно-очищенные и остальные 38% — как загрязненные. С сельскохозяйственных угодий в гидрографическую сеть смыывается до 50% удобрений и ядохимикатов. Плотность выпадения серы на территорию России составляет 0,25—2, а аммонийного азота в среднем — $0,3 \text{ т/км}^2$ в год [2, 18]. В ряду токсикантов, загрязняющих окружающую среду, ртуть занимает особое положение, поскольку масштабы антропогенной эмиссии очень велики и соизмеримы с количеством металла, участвующего в природном глобальном цикле. Основным источником поступления ртути в окружающую среду является сжигание природного ископаемого топлива. Плотность атмосферных выпадений ртути на территории России в последние десятилетия составляет $20\text{—}45 \text{ кг/км}^2$ в год [90].

Тепловое загрязнение озер и водохранилищ происходит в результате сброса подогретых вод после охлаждения конденсаторов турбин тепловых электростанций. Распространяясь в водоеме под действием течений, подогретые воды образуют шлейфы с температурой в них на $8\text{—}10^\circ\text{C}$ выше, чем у природной воды [60, 94]. Тепловое воздействие нарушает термический, гидрохимический и гидробиологический режим отдельных участков водоемов [2]. Кроме того, тепловое загрязнение рек и малых водотоков наблюдается при разработках открытым способом россыпных месторождений золота в районах вечной мерзлоты, где в процессе подготовки полигонов практикуется искусственное оттаивание песков. Указанное техническое мероприятие приводит к дополнительному прогреву водотоков на $10\text{—}20\%$ по сравнению с естественными условиями, что отрицательно сказывается на водной флоре и фауне [8, 48, 93].

Физическое, или загрязнение взвешенными веществами, возникает при проведении на внутренних водоемах разного рода строительных работ и добычи полезных ископаемых. К таким работам, прежде всего, следует отнести дноуглубление в судоходных целях, подводную разработку месторождений песка и гравия, строительство портовых и гидротехнических сооружений, мостов, прокладку через водотоки трубопроводов и кабельных линий и т. д. Следствием перечисленных работ является кратковременное повышение в воде концентрации взвешенных веществ с образованием шлейфов мутневых вод, распространяющихся в водоеме

в зависимости от структуры течений [40]. К другим типам загрязнения можно отнести биологическое, рекреационное, радиоактивное [2,84].

Воздействие загрязняющих веществ на гидробионты разнообразно и затрагивает все уровни их организации: от субклеточного через индивидуальный организм к сообществам и экосистемам [98].

На примере верхневолжских водохранилищ показано, что в районах крупных промышленных городов вследствие загрязнения тяжелыми металлами наблюдается обедненный видовой состав макрофитов. Комплекс загрязнителей угнетающе действует на фито- и зоопланктон. Фотосинтез угнетается почти в три раза по сравнению с естественными условиями. Разнообразие зоопланктона снижается до 10—22% от общего списка видов, встречающихся выше городов. В районе сброса сточных вод может происходить перестройка трофической структуры, отражающаяся на основных энергетических показателях — уменьшении в 1,5—2 раза доли хищников в продукции и увеличении затрат на поддержание структуры сообщества [80].

Как в озерах, так и в водохранилищах в зоне влияния сточных вод обилие донных беспозвоночных значительно ниже, а их видовой состав беден по сравнению с чистыми участками. При органическом загрязнении перестраивается трофическая структура бентосного сообщества [7, 33].

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) относятся к группе приоритетных загрязняющих веществ. Первые из них попадают в окружающую среду в результате утечек из трансформаторов, конденсаторов, теплообменников, гидравлических систем, выщелачивания и испарения из различных технических установок, сброса жидких промышленных отходов. Источниками антропогенного загрязнения среды ПАУ являются практически все виды деятельности человека, связанные с добычей, транспортировкой, переработкой или сжиганием углеводородных полезных ископаемых [90]. ПХБ и ПАУ обнаружены в воде, в донных отложениях, в макрозообентосе и рыбах. В рыбе эти токсиканты найдены как у хищников, так и планктофагов и бентофагов с самыми высокими концентрациями в печени особей.

Ртутное загрязнение способствует накоплению ртути в мышцах хищных рыб. Содержание ртути в печени, составляющее 70—80% от уровня в мышцах, свидетельствует о хроническом поступлении металла в организм рыб. Поскольку ртуть интенсивно мигрирует по трофическим цепям, особенности структуры сообществ гидробионтов могут существенно влиять на интенсивность накопления этого металла в консументах. В результате сопоставления данных по накоплению ртути в окуне с количественными характеристиками бактерио-, фито-, зоопланктона и зообентоса было показано, что содержание металла в мышцах рыб выше там, где наблюдались максимальные скопления зоопланктона и бактериопланктона [90].

Воздействие токсикантов при сбросе сточных вод (особенно залповом) приводит к глубоким нарушениям иммунной системы рыб с после-

дующей массовой гибелью особей, перемещением отдельных локальных их группировок на более благоприятные участки водоема, снижением численности и плотности рыбного населения [90]. Кроме того, химическое загрязнение внутренних водоемов влияет на видовой состав и численность эктопаразитов, воздействует на паразито-хозяйинные отношения, вызывает нарушение видовой специфичности и расширение круга хозяев того или иного вида паразитов [23].

По масштабам воздействия на качественное состояние водных объектов тепловые электростанции не относятся к числу очень «грязных» предприятий. Вместе с тем, влияние подогретых вод ТЭС на озера и водохранилища совместного пользования неоднозначно и имеет как положительные, так и отрицательные последствия [94].

Среди положительных воздействий на термический, гидрохимический и гидробиологический режимы водоемов следует отметить увеличение видового разнообразия гидробионтов, инвазию на север теплолюбивых видов флоры и фауны, повышенный рост кормовых объектов для рыб, повышение фотосинтеза водорослей, удлинение вегетационного периода и т. д. Вместе с тем тепловое загрязнение может привести к значительному развитию в водоемах отдельных организмов (простейших, бактерий, водорослей), избыток которых вызовет ухудшение санитарных и технических показателей качества воды. Повышение температуры воды одновременно с загрязнением водоема бытовыми и промышленными стоками угнетает развитие гидробионтов, способствует ухудшению органолептических свойств воды, используемой для хозяйственно-питьевого водоснабжения и т. д. [94].

Как уже отмечалось, разного рода строительные работы, проводимые при сооружении гидротехнических объектов и в процессе эксплуатации водохранилищ, включают перемещение больших масс грунта в пределах различных биотопов речных и центральных плесов водоемов и оказывают непосредственное влияние на условия обитания гидробионтов.

Постоянный фактор воздействия на качество поверхностных вод при проведении строительных работ — повышение мутности в районе перемещения грунта. При этом зоны повышенной мутности наблюдаются непосредственно в районе извлечения грунта, в местах стыка труб пульпопровода (первичная зона) и в месте отвала грунта в воду (вторичная зона) [36].

В зоне повышенной мутности происходит осаждение взвешенных веществ, концентрации которых особенно велики в придонном слое в районе расположения добывающей техники, что приводит к ухудшению условий обитания зоопланктона и зообентоса, составляющих кормовую базу рыб. Так, в Иваньковском водохранилище на месте выемки грунта в действующем карьере в период работы земснаряда содержание взвешенных веществ в придонном слое у механизма достигало 768 мг/л, а на расстоянии 1 км ниже по течению — 12,2 мг/л при среднем значении мутности для водохранилища 6,1 мг/л. Биомасса бентоса

составляла всего $0,9 \text{ г/м}^2$, что в 5—50 раз меньше, чем в старых недействующих карьерах [10].

Исследования с использованием эхолотов показали, что в действующих карьерах на участках, ближайших к месту работы земснаряда, рыбы отсутствовали как в придонном слое, так и непосредственно в толще воды. Тем не менее, все участки за пределами зоны отпугивающего действия земснаряда, практически сразу становились наиболее посещаемыми местообитаниями рыб, характеризующимися высокой временной устойчивостью рыбных скоплений. В дальнейшем, особенно после прекращения разработки карьера, возрастала его роль как нагульного биотопа. Интенсивность этого процесса достаточно велика, т.к. вследствие выработки карьера формируется дополнительная изрезанность рельефа дна, уменьшается воздействие стокового течения, усиливается вклад ветра и собственно рельефа дна в формирование циркуляции воды. Образование круговоротов воды с пониженными скоростями течения приводит к благоприятным гидродинамическим условиям для выживания и жизнедеятельности гидробионтов.

1.3. Моделирование влияния абиотических факторов на распределение гидробионтов

В настоящее время методы математического моделирования являются наиболее эффективными методами изучения и прогнозирования течений в озерах и водохранилищах, а в некоторых случаях могут быть единственным средством прогноза изменений гидрологического режима и экосистемы внутренних водоемов. Согласно современным представлениям [86, 97, 105], при моделировании динамических процессов в озерах и водохранилищах используются стационарные и нестационарные модели, которые включают три основных класса, отличающихся сложностью решения и задачами исследования: одномерные по горизонтали или вертикали, двумерные в горизонтальной или вертикальной плоскости и трехмерные.

Одномерные модели как наиболее простые используются для моделирования речных потоков, а двумерные — применяются для изучения ветровых и сейшевых течений, штормовых нагонов и т. д. Двухмерные в горизонтальной плоскости модели применяются при моделировании общей циркуляции водоема и по сути включают большое многообразие моделей ветровых течений: экмановского типа; простые, проинтегрированные по вертикали, однослойные модели; многослойные и многоуровневые модели. Двухмерные в вертикальной плоскости модели используются для исследования течений в заливах и эстуариях [85]. Трехмерные диагностические и прогностические модели, разработанные для океанических условий, применяются при моделировании динамических процессов в крупных глубоких озерах, где важно учитывать стратификацию вод, наличие термобара, апвеллингов и другие явления [41].

Гидродинамические модели являются одним из главных блоков, используемых в комплексных моделях функционирования экосистем водоемов, в том числе и при моделировании воздействия динамики вод на распределение гидробионтов. Вместе с тем, несмотря на кажущуюся очевидность использования математических моделей для изучения роли гидродинамики в формировании скоплений гидробионтов, в исследованиях они применяются крайне редко. Анализ публикаций по математическому моделированию за последние 10—15 лет показывает, что наибольшие успехи достигнуты при моделировании распределения и перемещения планктона и рыб в морских бассейнах. В частности проведены:

- расчет вертикальных движений планктона с учетом его активного перемещения, размеров, освещенности, вязкости среды, интенсивности турбулентного перемешивания [111];

- моделирование горизонтального распределения планктона с учетом структуры приливо-отливных течений и биологии самих организмов [104];

- трехмерное моделирование пространственного распределения и траекторий перемещения отдельных возрастных стадий зоопланктона в районах апвеллинга с учетом скорости развития, смертности, суточных вертикальных миграций (СВМ) особей [110];

- расчеты скоростей геострофической циркуляции с использованием уравнений Лагранжа, а также с помощью модели интегральной ветровой циркуляции вычисление в верхнем квазигомогенном слое траекторий переноса зоопланктона с учетом его СВМ, икры, личинок и молоди рыб, рассматриваемых как пассивная примесь (гидробионты пассивных стадий развития) [3, 102].

Существенно меньше сведений о моделировании перемещения скоплений гидробионтов в разнотипных озерах и водохранилищах. Следует выделить одномерные (однослойную и двухслойную) стационарные и нестационарные модели, используемые для расчета концентраций хлорофилла вдоль продольной оси водоема [108, 109], а также стационарную трехмерную модель для расчета распределения фитопланктона в заливах крупных озер [101].

Первые попытки оценки перемещения скоплений зоопланктона под действием течений были выполнены для Рыбинского водохранилища [6]. В эксперименте предполагалась двухслойная структура течений. Скорость движения воды в верхнем слое (0—3 м) задавалась равной 1—1,8% скорости ветра. Для нижнего слоя скорость движения воды принималась в 2 раза меньшей скорости поверхностного течения. Направление течения в верхнем слое соответствовало направлению ветра, а в нижнем слое вода перемещалась в противоположную сторону. Учитывалась СВМ планктона. В результате построения траекторий перемещения организмов за месячный период было отмечено незначительное их суммарное смещение относительно начального положения скоплений. Такой же алгоритм расчета был использован в даль-

нейшем и для моделирования перемещения ранней молоди рыб в Волжском плесе Рыбинского водохранилища и в оз. Плещеево [29, 58].

К частным видам моделирования распределения гидробионтов под действием гидродинамических факторов относятся: восстановление полей концентраций хлорофилла «а» (с учетом ветровых и стоковых течений) и вертикального перемешивания вод в днепровских водохранилищах и моделирование распространения средней по живому сечению концентрации предличинки осетровых рыб в водохранилищах Нижней Волги, которое проводилось с помощью вероятностной модели и эмпирических отношений распределения предличинок в турбулентном потоке [20, 34].

К особому классу моделей следует отнести регрессионные модели, описывающие функциональную зависимость характеристик распределения гидробионтов от гидродинамических факторов. Применение регрессионных моделей позволяет с высокой степенью вероятности прогнозировать распределение скоплений планктона, высшей водной растительности и рыб в пределах акватории водоема под воздействием волн и течений. К пионерским в этой области можно отнести работы, позволившие установить достоверные регрессионные зависимости между относительным содержанием хлорофилла «а», скоростью и захватом растворенного кислорода, рН среды, минерализацией и морфоэдафическим индексом (отношение общей минерализации к средней глубине) озер, с другой стороны. Приведены эмпирические связи (уравнения парной и множественной регрессии) величины промышленного вылова рыбы и ихтиомассы с перечисленными лимнологическими показателями.

В качестве примера аналогичных исследований на озерах следует отметить работы С. П. Китаева [27, 28]. Проанализировав лимнологическую информацию по нескольким тысячам озер разных географических зон, им охарактеризованы взаимосвязи между биомассой зоопланктона, бентоса, ихтиомассой и промышленной рыбопродукцией, с одной стороны, и площадью, средней и максимальной глубиной, показателем условного водообмена, прозрачностью воды, показателем относительной прозрачности воды, термическим режимом, цветностью, содержанием растворенного кислорода, рН среды, минерализацией и морфоэдафическим индексом (отношение общей минерализации к средней глубине) озер, с другой стороны. Приведены эмпирические связи (уравнения парной и множественной регрессии) величины промышленного вылова рыбы и ихтиомассы с перечисленными лимнологическими показателями.

Необходимо сказать, что построение регрессионных моделей должно основываться на обширных натурных данных распределения гидродинамических и гидробиологических характеристик. Отсутствие же необходимого объема фактического материала зачастую затрудняет применение на водохранилищах рассмотренного класса моделей.

Одним из перспективных направлений в изучении взаимодействия абиотического и биотического звеньев экосистемы водоемов является математическое моделирование пространственно-временной изменчивости концентраций консервативных и неконсервативных примесей, химических и биологических соединений, при котором учитывается гидродинамика водных масс и используются одно-, двух-, трехмерные и балансо-

вые модели качества воды [19, 40, 73, 84, 88, 107]. Такие модели полезны при разработке мероприятий по управлению качеством воды в целях улучшения состояния и охраны экосистем озер и водохранилищ.

Разновидностью моделей качества воды, имеющих, на наш взгляд, самостоятельный статус, являются модели взаимодействия загрязняющих веществ (ЗВ) с гидробионтами. К вопросам, решаемым с помощью этих моделей, можно отнести накопление токсикантов в стационарной экосистеме, выведение и ассимиляция ЗВ гидробионтами, влияние аккумуляции токсичных веществ на структуру экосистемы. В результате появляется возможность оценки накопления ЗВ в водной экосистеме на основе экологических характеристик каждого вида и сложившейся структуры пищевых отношений, а также адекватного понимания последствий антропогенного загрязнения водоема [39].

Таким образом, проведенный анализ имеющейся информации по воздействию абиотических факторов на распределение гидробионтов в озерах и водохранилищах позволяет сделать следующие выводы:

- 1) недостаточно информации по влиянию общей циркуляции вод на распределение в водохранилищах планктона и рыб.
- 2) практически полностью отсутствует информация по воздействию динамических процессов на биоценозы мелководий водохранилищ;
- 3) дана исчерпывающая информация по воздействию температурного фактора на функционирование рыбных сообществ внутренних водоемов;
- 4) детально охарактеризовано влияние загрязняющих веществ, поступающих от различных источников на сообщества гидробионтов во внутренних водоемах.

Следовательно, актуальными направлениями по изучению взаимодействия абиотической и биотической частей экосистем водохранилищ следует считать:

- определение роли динамических процессов в формировании биоценозов мелководной зоны водоемов;
- установление статистически значимых зависимостей между показателями динамики вод, с одной стороны, и количественными характеристиками мелководных скоплений рыб (величиной уловов, урожайностью и т. д.), с другой — выявление общих закономерностей распределения рыб в мелководной зоне водоемов;
- установление количественных зависимостей между показателями планктонных сообществ (численностью и биомассой, содержанием хлорофилла «а») и рыбных (ихтиомассой, плотностью распределения) сообществ, с одной стороны, и параметрами течений — с другой;
- определение зон воздействия загрязняющих веществ в водоеме при различных видах хозяйственной деятельности человека.

Получить ответы на большую часть перечисленных вопросов и призван излагаемый ниже программный комплекс для оценки воздействия гидродинамических и антропогенных факторов на отдельные виды гидробионтов в мелководной и глубоководной зоне водохранилищ.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Общие сведения

Предлагаемый программный комплекс (ПК), разработанный для оценки влияния гидродинамических и антропогенных факторов на экосистему водохранилищ, представляет собой набор самостоятельных и взаимосвязанных блоков (математических моделей). С помощью ПК решаются следующие задачи:

- изучение особенностей структуры течений в мелководной и глубоководной зонах водохранилищ при различных гидрометеорологических условиях;
- расчет траекторий перемещения единичных объемов воды — индикаторов структуры горизонтальной циркуляции водных масс;
- расчет перемещения и распределения под действием течений скопелений планктона и рыб, выявление зон аккумуляции биомассы;
- расчет распространения вод повышенной мутности, возникающих в результате проведения на водоемах разного рода строительных работ;
- расчет распространения консервативной и неконсервативной примеси, поступающей в водоем со сточными водами производственной, бытовой и сельскохозяйственной сферы и с водами притоков;
- расчет режимных характеристик ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах водохранилищ;
- оценка раздельного и совместного воздействия волн и течений на мелководные участки водохранилищ;
- оценка пространственного распределения волновых нагрузок на биоценозы мелководий;
- расчет плотности зарастания высшей водной растительностью мелководий в зависимости от волновых нагрузок с использованием регрессионных моделей;
- расчет плотности распределения фито-, зоопланктона и рыб под действием течений в глубоководной зоне водохранилищ с использованием регрессионных моделей.

Таким образом, в соответствии с кругом решаемых задач программный комплекс включает: модель общей циркуляции водных масс, являющейся основой для локальных моделей перемещения гидробионтов, распространения консервативной и неконсервативной примеси (блоки «FFF», «LAGRANGE», «TURBIDITY»), а также модели прибрежных динамических процессов и их воздействия на биоценозы мелководий (блоки «WAVE», «BOTTAN», «PLANT») (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Структура программного комплекса

Применение программного комплекса к конкретному водоему требует обширной базы данных, включающей начальные условия, сведения о морфометрии и рельефе дна водоема, изменениях во времени и по пространству гидрометеорологических параметров и концентраций параметров качества воды, распределении ряда гидробиологических характеристик. Сбор и обобщение необходимой информации, создание и отладка базы данных, расчет, графическое представление и анализ результатов потребует от исследователя значительных усилий. Следует согласиться с В. В. Пуклаковым [64], что при эксплуатации моделей гидрологических процессов до 40% времени затрачивается на подготовку данных, 10% — на проведение расчетов и 50% — на анализ полученных результатов.

Рассмотрим модели ПК, начиная с базового блока «FFF» и далее в следующей последовательности: «LAGRANGE», «TURBIDITY», «WAVE», «BOTAN», «PLANT».

2.2. Выбор, верификация, допущения и ограничения моделей

Вопросом первостепенной важности при изучении структуры и изменчивости внутриводоемных процессов методами математического моделирования является выбор модели, наиболее адекватно отражающей исследуемый процесс. В связи с этим, основными критериями выбора моделей для изучения особенностей протекания динамических процессов в мелководной и глубоководной зонах водохранилищ служили: общезвестность методов и соответствующих расчетных формул, большой опыт их практического применения на водоемах разного типа, гибкость в описании моделируемого процесса, возможность использования простых конечно-разностных схем. Следует заметить, что неотъемлемая часть моделирования — верификация моделей, позволяющая не только провести выбор, но и сформулировать допущения и ограничения методов моделирования, используемых при решении тех или иных задач.

2.2.1. Блок «FFF». В глубоководной зоне озеровидных плесов волжских водохранилищ наблюдается достаточно широкий спектр динамических процессов, характерных для разнотипных озер и даже морей [1]. Поэтому наиболее полное описание динамики вод водохранилищ могло бы основываться на применении трехмерных диагностических и прогностических моделей. Однако с возрастанием сложности модели увеличивается и степень сложности ее практической реализации. Следовательно, при выборе той или иной гидродинамической модели необходим разумный подход, основанный на постановке задач исследований, которые могут быть решены с применением выбранной модели. Такая модель должна обеспечить получение максимума информации при различных состояниях среды, поддаваться верификации, отличаться простотой вычислительной схемы и надежностью ее практической реализации.

Поскольку в озеровидных плесах крупных равнинных водохранилищ преобладают ветровые течения, в качестве модели для изучения особенностей структуры общей циркуляции водных масс может быть использована стационарная модель ветровых течений (полных потоков), разработанная А. И. Фельзенбаумом [85] для мелких морей и впоследствии адаптированная Государственным океанографическим институтом для озер и водохранилищ [66]. Модель позволяет учесть основные, формирующие течения, факторы: напряжение ветра на водную поверхность, приток в водоем и сток из него (что особенно важно для водохранилищ) и реаль-

ный рельеф дна. Кроме того, модель отличается простой конечно-разностной схемой решения задачи, достаточной гибкостью при описании структуры течений с учетом меняющихся граничных условий.

Исходные уравнения, начальные и граничные условия¹. Полагается, что движение воды обуславливается тангенциальным напряжением ветра над водоемом с учетом влияния рельефа дна, притока в водоем и стока из него. Наклонами свободной поверхности, вызванными стоками и нагонами вод в результате неравномерности ветра с учетом влияния берегов и стока рек, трением о дно и силой Кориолиса пренебрегается. На поверхности водоема тангенциальное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в воде: $\partial u / \partial z = T_x$, $A(\partial v / \partial z) = T_y$. Давление равно атмосферному давлению: $p = p_a$. На дне водоема движение отсутствует: $u = v = w = 0$.

Компоненты скорости течения u и v вдоль осей x и y соответственно и понижение уровня ζ вдоль оси z , направленной вниз, определяются по распределению функций полных потоков ψ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) &= \frac{1}{2} \text{rot}_z \bar{T} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= - \frac{3T_x}{2gH\rho} - \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= - \frac{3T_y}{2gH\rho} + \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \\ u &= \frac{T_x(H-Z)}{A} + \frac{g\rho}{A} \left(\frac{H^2 - Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \\ v &= \frac{T_y(H-Z)}{A} + \frac{g\rho}{A} \left(\frac{H^2 - Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{T} — вектор тангенциального напряжения ветра, а T_x и T_y — его составляющие по оси x и y ; A — коэффициент вертикального турбулентного обмена: $A = \gamma W H / 4 \rho k$, где коэффициент $\gamma = 3,25 \cdot 10^{-6}$, W — скорость ветра, H — глубина, ρ — плотность воды, k — ветровой коэффициент вязкости для данного водоема; Z — расстояние от поверхности до расчетного горизонта.

Следует отметить, что на береговой линии задается сама функция $\psi = 0$, на жидкой границе — $\partial \psi / \partial n = 0$.

¹ Здесь и далее окончательные формулы определения параметров гидродинамических процессов приведены вместе с алгоритмами их расчета в главе III.

В результате решения системы уравнений (1) производится расчет скоростей и направлений течения при конкретных гидрометеорологических условиях на отдельных горизонтах в узлах регулярной сеточной области с шагом $\Delta x = \Delta y$ без учета островов. В случае необходимости получения характеристик осредненного от поверхности до дна (интегрального) переноса воды составляющие u и v осредняются по каждой вертикали:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{z=\zeta}^H u dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{z=\zeta}^H v dz. \quad (2)$$

Если параметры u , v и ζ определены, то из уравнения неразрывности в дифференциальной форме в каждой узловой точке расчетной сетки легко определить вертикальную составляющую скорости течения w :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$w = \int_z^H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz.$$

В целях получения обобщенных сведений о горизонтальной циркуляции вод на протяжении какого-либо длительного периода (например, безледного периода) целесообразно проводить расчеты осредненной за выбранный период циркуляции, исходя из следующих допущений. Весь временной период, в пределах которого рассматривается нестационарный процесс, разделяется на ряд интервалов ΔT_i таких, что в каждом из них процесс может быть рассмотрен как квазистационарный, за исключением переходных периодов τ_i . В случае $\tau_i \ll \Delta T_i$ получение осредненной циркуляции сводится к решению серии из n стационарных гидродинамических задач для всего набора ветровых полей над акваторией водохранилища: расчету функций тока $\psi_j (j = 1, 2, \dots, n)$ и осреднению этих функций по множеству реализаций:

$$\varphi = \left(\sum_{i=1}^n \Pi_{i,j} \psi_j \right) / 100, \quad (4)$$

где Π — повторяемость ветровых ситуаций на временном интервале (в %) [32].

Расчеты по модели позволяют получить дополнительную информацию о динамических характеристиках водной среды: выделить зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса воды и определить горизонтальный размер круговоротов как удвоенное расстояние от центра до наибольшей скорости на периферии вихря согласно [56]; рассчи-

тать скорость и направление переноса воды в отдельных слоях водной толщи; рассчитать параметры течений без учета какого-либо одного (или нескольких) внешних факторов — ветра, притока и рельефа дна. В последнем случае исключение из граничных условий воздействия ветра позволяет вычислить характеристики потока в условиях чисто стоковых течений.

Для обоснования применения используемой в работе стационарной модели ветровых течений к условиям разнотипных водохранилищ был разработан комплексный метод ее верификации.

Верификация гидродинамической модели. В качестве исходной информации для верификации стационарной модели ветровых течений использовались: схемы интегральной циркуляции вод, рассчитанные при различных гидрометеорологических условиях; скорости и направления течения, измеренные на водохранилищах при различных гидрометеорологических ситуациях; поля температуры и электропроводности воды, полученные при проведении гидрологических съемок; данные по биомассе и численности планктонных водорослей, зоопланктона, распределению скоплений рыб [30, 52, 68, 91].

Комплексный метод верификации включал [55]:

- разделение рассчитанной по модели крупномасштабной циркуляции вод на циклоидические и антициклонические круговороты;
- сопоставление расположения выделенных структурных элементов циркуляции воды с распределением по акватории аномалий температуры и электропроводности воды, скоплений фито-, зоопланктона и рыб;
- сравнение рассчитанных по векторам осредненного переноса траекторий перемещения локальных зон водной массы с фактическими траекториями перемещения аномалий температуры и электропроводности воды, границ водных масс и скоплений гидробионтов в выделенных слоях или во всей толще от поверхности до дна водоема (метод Лагранжа);
- нахождение регрессионных зависимостей между расчетными параметрами течений и значениями биомасс фитопланктона в различных участках водоема;
- сравнение рассчитанных и измеренных параметров течений на разных горизонтах по установленной сетке станций (метод Эйлера).

В последнем случае сравнение рассчитанных и измеренных характеристик течения осуществлялось на горизонтах 0,5; 2; 4 и 6 м. В качестве критерия сходимости использовалась абсолютная погрешность:

$$\pm \Delta V = \bar{V}_n - \bar{V}_p, \quad \pm \Delta \alpha = \bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}_p, \quad (5)$$

где \bar{V}_p и $\bar{\alpha}_p$ — средние параметры течения, вычисленные по четырем значениям, рассчитанным на вертикалях в узловых точках сетки, где выполнялось контрольное измерение; \bar{V}_n и $\bar{\alpha}_n$ — средние значения измеренных флуктуаций скорости и направления течения на соответствующей вертикали.

Погрешности $|\Delta V|$ и $|\Delta \alpha|$ сравнивались с амплитудой флуктуаций измеренных параметров течений A_v и A_α на каждом горизонте. При вы-

полнении условия $\Delta V < A_c$ и $\Delta \alpha < A_\alpha$ результаты моделирования считались удовлетворительными.

Дополнительная проверка сходимости результатов моделирования была проведена по методу Аллендера [95], суть которого применительно к нестационарным моделям заключалась в следующем. Различия между наблюдаемыми и рассчитанными скоростями течений за период $n\Delta T$ оценивались по их среднему квадратическому отклонению:

$$\sigma_1 \equiv \left[\frac{1}{n} \sum_{T=n\Delta T}^{n\Delta T} (V_n(T) - V_p(T))^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где n — число членов ряда; ΔT — дискретность измерений параметров течений.

Среднее квадратическое отклонение между измеренными и расчетными скоростями σ_1 сравнивалось со средним квадратическим отклонением измеренных скоростей σ_2 . Совпадение считалось удовлетворительным, если $\sigma_1 < \sigma_2$.

Для определения точности имитации моделью направления течения за время $n\Delta T$ находилось среднее различие между фактическими и рассчитанными направлениями течения [95]:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{n} \sum_{T=n\Delta T}^{n\Delta T} \cos^{-1} \left(\frac{V_n \cdot \bar{V}_p}{|V_n| |V_p|} \right). \quad (7)$$

Полученные $\Delta \alpha$ на заданных глубинах осреднялись по ряду станций M с целью оценки меры совпадения сравниваемых величин:

$$\Delta \alpha_A = \frac{1}{M\pi} \sum_{i=1}^M \Delta \alpha_i. \quad (8)$$

Предел изменений $\Delta \alpha_A$ лежал между 0 (наилучшее совпадение, $\Delta \alpha \rightarrow 0$) и 1 (нахудшее совпадение, $\Delta \alpha \rightarrow 180^\circ$).

Применительно к стационарному случаю, принимаем в формулах (6) и (7) период наблюдений $n\Delta T$ за число сравнений. Следует отметить, что несмотря на возможность применения метода Аллендера для верификации модели, основным недостатком его использования является неопределенность максимально возможных расхождений между модельными и измеренными характеристиками течений. Из формул (6) и (8) очевидно, что лучшее совпадение по V достигается при $\sigma_1 \rightarrow 0$, а по α — при $\Delta \alpha_A \rightarrow 0$. Верхний же предел погрешностей по V явно не установлен (расчетные скорости могут превышать фактические в 2 раза и более), а по α — нереально велик: $\Delta \alpha_A = 180^\circ$.

В связи с этим, на наш взгляд, предпочтительней использовать предложенный выше количественный критерий, основанный на вычислении абсолютных погрешностей между измеренными и расчи-

танными параметрами течения (формула (5)) и сравнении их с амплитудами флуктуаций измеренных скоростей и направлений течения. Критерий Аллендера лучше использовать при первоначальной, грубой оценке способности модели описывать характер циркуляции вод в водоеме.

Таблица 2.1

Результаты верификации стационарной гидродинамической модели по измеренным скоростям и направлениям течений

Характеристика	Водохранилище, плес, участок			
	Рыбинское		Горьковское	Куйбышевское
	Главный	Волжский	Речной	Северная часть
n	150	23	10	43
ΔV , см/с	0-18	1-23	0-17	0-20
A_v , см/с	0-18	3-27	—	—
$\Delta \alpha$, град.	1-170	0-90	1-38	1-174
A_α , град.	5-200	5-130	—	—
$\Delta \bar{V}$, см/с	3	10	5	7
$\Delta \bar{\alpha}$, град.	30	30	20	45
\bar{A}_v , см/с	5	13	—	—
\bar{A}_α , град.	46	73	—	—
Ошибки измерений:				
средние: ΔV_s , см/с	7-8	7-8	—	7-8
ΔV_n , см/с	—	—	2-3	—
$\Delta \alpha_s$, град.	15-20	15-20	—	15-20
$\Delta \alpha_n$, град.	—	—	5-10	—
предельные: ΔV_s , см/с	15	15	—	15
ΔV_n , см/с	—	—	5	—
$\Delta \alpha_s$, град.	50	50	—	50
$\Delta \alpha_n$, град.	—	—	30	—
по методу Аллендера:				
δ_1	3,2	6,7	5,1	6,0
δ_2	3,9	7,0	11,3	6,3
$\Delta \alpha_A$	0,2	0,2	0,1	0,3

Примечание: n — число членов ряда; $\Delta V_s, \Delta V_n$ — абсолютной ошибки измерений скорости вертушками и поплавками; $\Delta \alpha_s, \Delta \alpha_n$ — абсолютной ошибки измерений направлений соответственно вертушками и поплавками (остальные обозначения даны в тексте).

В результате верификации было установлено, что вычисленные по модели скорости и направления течения идентичны измеренным со средней ошибкой расчета, не превышающей следующие критерии: амплитуды флуктуаций измеренных направлений (A_a) и скоростей (A_v) течения, предельные ошибки измерения скорости и направления течений гидрометрическими вертушками в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах, предельных ошибок измерения скоростей и направлений течения поплавками в Горьковском водохранилище. Кроме того, были выполнены все условия положительной сходимости модели с натурными данными, оцененные по методу Аллендера (табл. 2.1).

Проверка адекватности воспроизведения моделью реальных динамических процессов в водохранилищах на качественном уровне так же показала хорошее соответствие положения структурных элементов циркуляции вод и экстремумов полей гидрофизических и биологических характеристик. Средняя ошибка взаимного совпадения положения аномалий температуры и электропроводности воды с областями круговоротов, расчета траекторий перемещения аномалий и скоплений рыб под действием течений, соответствия вращения аномалий вращению радиуса-вектора круговоротов не превышала 30% (табл. 2.2). Получен достаточно высокий коэффициент корреляции между биомассами планктона и скоростями переноса воды в Рыбинском водохранилище и положением скоплений рыб в зависимости от характера переноса воды в оз. Плещеево.

Следует отметить, что рассмотренная выше процедура верификации относилась главным образом к ветровым течениям. Для обоснования возможности применения настоящей модели к расчету чисто стоковых течений проводилась дополнительная ее проверка на примере Волжского плеса Рыбинского водохранилища при фактических расходах воды и близких к штилевым ветровым условиям. Было показано, что среднее расхождение между измеренными и модельными скоростями и направлениями течения составляет в среднем 2 см/с и 5—8 град. соответственно и не превышает точности измерения параметров течения приборами БПВ-2р и АЦИТ (3 см/с и 10 град.).

Основными ограничениями применимости модели при расчете параметров течений в водохранилищах являются следующие:

1) Модель не позволяет описать поперечную циркуляцию в русловой зоне речных плесов водохранилищ, т. е. она адекватно воспроизводит только продольную составляющую вектора скорости стокового течения и его плановую картину.

2) Расчеты в речных плесах Рыбинского водохранилища (Волжском, Моложском, Шекснинском), в Ивановском плесе Ивановского водохранилища и в нижней части Угличского водохранилища при различных расходах воды по главным притокам и ветре, совпадающем по направлению со стоковым течением позволили выявить, что учет воздействия ветра со скоростью 4—6 м/с (50% обеспеченности) приводит к искажениям структуры циркуляции воды по отношению к охарактеризованной выше

Таблица 2.2

Результаты верификации стационарной гидродинамической модели по распределению гидрофизических и биологических характеристик

Характеристика	Рыбинское водохранилище	оз. Плещеево
$\Delta S_T, \%$	0–50	0–50
$\Delta S_3, \%$	0–20	0–20
$\Delta \bar{S}_{T,3}, \%$	20	20
$\Delta \ell_T, \%$	16–33	–
$\Delta \ell_3, \%$	16–40	–
$\Delta \bar{\ell}_{T,3}, \%$	25	–
$\Delta \alpha_T, \text{град.}$	4–20	–
$\Delta \alpha_3, \text{град.}$	8–15	–
$\Delta \bar{\alpha}_{T,3}, \text{град.}$	12	–
$\Delta \ell_{\omega T}, \%$	20–33	–
$\Delta \bar{\ell}_{\omega T}, \%$	26	–
$\omega_T, \text{с}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_\omega, \text{град.}$	16	40
$\omega_{KP}, \text{с}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{KP}, \text{град.}$	25	36
$\Delta \omega_T, \%$	66	14
$\Delta \alpha_\omega, \%$	56	10
$r_\Phi(p=0,9)$	–0,75	–
$r_p(p=0,9)$	–	0,81
$\Delta \ell_p, \%$	10–45	–
$\Delta \alpha_p, \%$	15–40	–
$\Delta \bar{\ell}_p, \%$	29	–
$\Delta \bar{\alpha}_p, \%$	23	–

Примечание: ΔS — относительная ошибка по временному перекрытию областей аномалий и круговоротов; $\Delta \ell, \Delta \alpha$ — соответственно относительная и абсолютная ошибка расчета длины и направления перемещения аномалий температуры (Т) и электропроводности (Э) воды, фронтальных зон (ФЗ) водных масс, скоплений рыб (Р); ω, α_ω — угловая скорость вращения и угол поворота за сутки аномалий температуры (Т) воды и радиуса — вектора круговорота (индексы Т, КР) соответственно; $\Delta \omega, \Delta \alpha_\omega$ — относительные ошибки расчета ω и α_ω для аномалий и круговорота соответственно; r — коэффициент корреляции (Φ — фитопланктон, Р — рыбы).

по натурным данным. При расходах воды по р. Волге, Мологе, Шексне 50% обеспеченности (300, 400, 170 и 210 м³/с соответственно для Иваньковского водохранилища, Угличского водохранилища и Волжского плеса Рыбинского водохранилища, Моложского и Шекснинского плесов последнего) по затопленным руслам названных рек наблюдается ветровое противотечение, полностью блокирующее стоковый перенос воды. В Волжском плесе Рыбинского водохранилища это явление прослеживается даже при расходах 1000—1200 м³/с.

Следовательно, применение стационарной модели для расчета циркуляции воды в волжских водохранилищах возможно при следующих граничных условиях:

- стоковые течения моделируются без воздействия ветра с учетом любых, свойственных водоему, сбросных расходов воды для всех водохранилищ каскада;

- суммарная ветровая и стоковая циркуляция воды моделируется при направлениях ветра, противоположных направлению стокового течения и любых, свойственных водоему, сбросных расходах воды (например, речные плесы Рыбинского водохранилища), при любых направлениях ветра и расходах по главным притокам (таких, как Главный плес Рыбинского водохранилища и нижележащие водохранилища каскада).

Ограничения по применению модели к водохранилищам Средней и Нижней Волги, начиная с Горьковского, снимаются из-за увеличения объема стока, достаточного для существенного уменьшения вклада ветра в формирование общей циркуляции воды.

Таким образом, в результате проведенной верификации по данным многолетних наблюдений за пространственно-временной изменчивостью полей гидрофизических и гидробиологических характеристик было показано, что расчеты по стационарной гидродинамической модели производятся со средней ошибкой, не превышающей 30%. Такая точность расчетов, с нашей точки зрения, вполне приемлема, поскольку погрешности определения средних количественных характеристик планктона в отдельные сроки варьируют в пределах 10—60%, ошибка расчета плотности рыб по траловым уловам может достигать 60%, а погрешность измерения плотности пелагических рыб эхометрической аппаратурой — 20—30% [91], что сопоставимо с ошибками расчета параметров течений по указанной выше модели.

Удовлетворительные результаты проверки адекватности модельного переноса наблюдаемому в водохранилищах позволяют использовать ее в качестве гидродинамического блока в моделях перемещения скоплений гидробионтов и выявления зон аккумуляции биомассы в водохранилищах разного типа, при описании распространения консервативной и неконсервативной примеси от различных источников, для определения границ зон пагубного воздействия взвесей на живые организмы.

2.2.2. Блок «LAGRANGE». Рассчитанные по гидродинамической модели компоненты вектора скорости (уравнения 6) используются для лагранжевых построений при вычислении координат движущихся точек. Предполагается, что точки перемещаются только под действием горизонтальных течений, без учета вязкости жидкости и диффузии. На каждом временном шаге (Δt) значение координат (x, y) точек вычисляются по известным значениям их координат и скорости на предыдущем шаге [72]:

$$x^n = x^{n-1} + u^{n-1} \Delta t; \quad y^n = y^{n-1} + v^{n-1} \Delta t, \quad (9)$$

где n — число циклов расчета.

Набор координат (x^0, y^0), (x^1, y^1), ... (x^n, y^n) определяет траекторию точек. В результате модельных вычислений по окончании любого интересующего интервала времени предусмотрен расчет итогового пути (L), скорости (V) и направления (α) перемещения точек. В целом рассматриваемая модель описывает нестационарное перемещение точки, группы точек, или пятна на фоне стационарного поля течений.

Проверка результатов моделирования перемещения точек проводилась для Волжского плеса Рыбинского водохранилища с шагом расчетной сетки 250 м. Проверка модели осуществлялась по фактическим скоростям и направлениям перемещения поплавков-указателей с демпферами на горизонтах 0,3; 2 и 4 м, выпущенных на двух станциях с глубинами 4 и 6 м. Начальное и конечное положения поплавков определялось с помощью секстанта [43] по береговым ориентирам и затем наносилось на карту масштаба 1:50 000. Время дрейфа поплавков достигало 3—5 часов, максимальное перемещение 1000—1200 м, а минимальное — ~100 м.

Следует отметить, что точность измерения течения поплавками зависит от воздействия ветра на надводную часть поплавка, неточности определения пути перемещения поплавка и отклонения скорости поплавка от средней скорости перемещения слоев воды, которые она характеризует. В первом случае, согласно табличным данным [87], ошибка выполненных измерений скорости не превышала 1 см/с, а в последнем, из-за малой глубины достигала всего 0,5 см/с. Существенный вклад в точность измерения течений поплавками вносила ошибка определения их местоположения, которая вычислялась по формуле [87]:

$$\Delta V = 4r/3t, \quad (10)$$

где r — точность определения положения поплавка (м), t — время дрейфа поплавка. Исходя из масштаба используемой карты точность определения положения поплавков составила 50 м, а ΔV — 1 см/с.

Суммарная же ошибка измерений скорости течения поплавками составила 2,5 см/с при зафиксированных скоростях течения от 2,5 до 13,3 см/с.

Расчет траекторий перемещения поплавков проводился по формуле (9) для гидрометеорологических условий, соответствующих условиям натурных наблюдений за перемещением поплавков. В дальнейшем при сравнении рассчитанных по модели и измеренных поплавками скоростей течения выбирались значения по крайней мере в 2 раза превышающие ошибку измерений.

Проведенное сравнение модельных и фактических скоростей дрейфа поплавков показало, на наш взгляд, удовлетворительную сходимость: в преобладающем большинстве случаев ошибка расчета не превышала точность измерения скорости течения в натурных условиях. Ошибки вычисленных по модели направлений переноса поплавков лежали в диапазоне 0—95 град. и также в преобладающем большинстве случаев не превышали, согласно [87], 30 град., т. е. предельную ошибку измерения поплавками направления течения (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Результаты верификации лагранжевой модели движения

Параметры	Горизонты, м		
	0	2	4
Измеренные скорости, см/с	6,6—11,9	4,7—13,3	4,8—9,4
Рассчитанные скорости, см/с	6,0—11,5	2,0—7,8	3,4—7,1
Абсолютные ошибки расчета, см/с	0,1—3,1	0—6,2	1,1—5,8
Средняя абсолютная ошибка расчета, см/с	1,5	2,8	3,0
Измеренные направления, град.	350—25	325—40	340—355
Рассчитанные направления, град.	340—25	345—44	310—5
Абсолютные ошибки расчета, град.	0—15	5—79	10—30
Средняя абсолютная ошибка расчета, град.	8	30	22

В биологическом блоке перемещение скоплений гидробионтов (фито-, зоопланктона и пелагических рыб) идентифицируется с перемещением точек, рассчитываемых по лагранжевой модели движения. При моделировании перемещения скоплений планктона учитываются особенности его вертикального распределения. Применительно к Рыбинскому водохранилищу основную биомассу фитопланктона всех открытых частей водоема в летний период (июнь — август) составляют синезеленые водоросли [71]. Наиболее интенсивно разви-

тие синезеленых происходит при штилевых условиях и скоростях течения ~ 4 см/с. При усилении ветра и возникновении вертикального перемешивания водоросли перемещаются в нижние слои. По данным Л. Г. Корневой [30], летом максимум синезеленых перемещается в пределах 14-метрового слоя, охватывающего практически всю толщу воды. Следовательно, при моделировании перемещения скоплений фитопланктона, рассматриваемого как пассивные живые организмы, можно допустить его равномерное распределение по вертикали и использовать в качестве входных данных в модель движения Лагранжа скоростей и направлений осредненного от поверхности до дна переноса воды, вычисленных по формулам (2).

Зоопланктон, в отличие от фитопланктона, способен совершать точные вертикальные миграции и противостоять течению. По данным Л. М. Семеновой [75], в Рыбинском водохранилище наиболее массовым видом ветвистоусых ракообразных, определяющих биомассу зоопланктона, является *Bosmina coregoni*. СБМ босмин достаточно четко выражены летом: ночью на протяжении 3—6 ч рачки держатся у поверхности в слое 0—3 м, с рассветом опускаются в средние и придонные слои. Собственная скорость движения рачков мала ($\sim 0,15$ см/с). Тем не менее, в расчетах их траекторий перемещения при осредненных по толщине слоев модельных скоростях переноса воды ~ 1 —4 см/с (слой 0—3 м) и $\sim 0,2$ —2 см/с (слой 3 м — дно), учет собственных скоростей движения рачков существенен.

Таким образом, вычисление траекторий перемещения скоплений зоопланктона осуществляется следующим образом. Нахождение в верхнем слое (0—3 м) босмин составляет 6 ч, в нижнем 18 ч. Переход из слоя в слой допускается принимать скачкообразным. Составляющие вектора скорости в слоях вычисляются по формулам, из которых впоследствии вычитается собственная скорость движения зоопланктона:

$$\text{для верхнего слоя} \quad \bar{u}_1 = \frac{1}{H_1} \int_{z=\zeta}^{H_1} u_1 dz, \quad (11)$$

$$\bar{v}_1 = \frac{1}{H_1} \int_{z=\zeta}^{H_1} v_1 dz,$$

$$\text{для нижнего слоя} \quad \bar{u}_2 = \frac{1}{H_2} \int_{z=H_1}^{H_2} u_2 dz, \quad (12)$$

$$\bar{v}_2 = \frac{1}{H_2} \int_{z=H_1}^{H_2} v_2 dz,$$

где H_1 и H_2 — толщина слоев.

Если в результате дрейфа в верхнем слое скопление на момент перехода в нижний слой оказывается вне этого слоя, т. е. в районах с глубинами ≤ 3 м, то оно продолжает перемещаться в верхнем слое. По истечении суток рассчитываются путь, скорость и направление перемещения скопления и строится вектор суточного переноса. Моделирование перемещения скоплений пелагических рыб в целом идентично моделированию переноса зоопланктона. В Рыбинском водохранилище основу планктоноядного комплекса ихтиофауны составляют снеток, синец, ряпушка, чехонь и молодь разных видов [49, 52]. В годы с благоприятными для роста рыб условиями в нагульных скоплениях снеток может составлять до 98%. Характер его СВМ в значительной мере определяется ветровыми условиями и пространственным распределением кормовых объектов: снеток постоянно находится в слое высокой плотности зоопланктона. По результатам траловых уловов в местах концентрации снетка находится большое количество молоди разных видов рыб [52].

Таким образом, основным допущением при расчете траекторий перемещения скоплений пелагических рыб являются пищевые взаимоотношения, принимая во внимание которые, вычисление переноса рыб течения производится как одно целое с переносом скоплений зоопланктона. Логически это вполне оправдано, т.к. в период нагула рыбы в составе дрейфующего биоценоза полноценно удовлетворяют свои жизненные потребности при минимальных затратах энергии.

Проверка результатов моделирования перемещения скоплений гидробионтов проводилась для Главного плеса Рыбинского водохранилища с шагом расчетной сетки 2 км. Как было показано многочисленными гидроакустическими и биотелеметрическими съемками [52, 91], в нагульный период в составе биоценозов рыбы, дрейфуя в водной толще, придерживаются скоростей и направлений потоков воды.

Моделирование по формуле (9) перемещения скоплений рыб выполнялось при различных ветровых условиях. Исходной информацией служили данные распределения рыб [91] в слое 3—7 м, полученные в результате проведения последовательных, с интервалом времени от 6 до 18 часов, гидроакустических съемок на микрополигонах (3х3 км), расположенных в западной части Рыбинского водохранилища.

Фактические скорости перемещения скоплений по течению варьировали в пределах 2—5 см/с, а их смещение относительно начального положения изменялось от 300 до 1500 м. Основной вклад в ошибку измерения скоростей смещения скоплений вносили погрешности определения начального и конечного местоположения скоплений. Эта ошибка вычислялась нами по формуле (10), причем за точность определения положения скопления (r) принималась ошибка оценки их горизонтальных размеров, которая согласно [91] могла составить в среднем 12%.

В результате проведенных расчетов полученная ошибка фактической скорости перемещения скоплений рыб не превышала 1 см/с. Сравнение же фактических и модельных перемещений скоплений показало, что последние смещались в направлении переноса воды в слое 3—7 м или с отклоне-

нием от него в среднем на 30 град. В преобладающем большинстве случаев модельные скорости движения скоплений не превышали их фактические скорости смещения более, чем на 1 см/с (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Характеристики перемещения скоплений пелагических рыб на полигоне в западной части Рыбинского водохранилища

Дата	Слой	n	α	W	V_{ϕ}	α_{ϕ}	V_p	α_p	ΔV	$\Delta \alpha$
7.06.85	3-7	1	322	6,7	2,9	262	3,1	300	0,2	38
8.06.85	3-7	2	85	4,8	3,5	275	3,7	335	0,2	60
13.09.85	3-7	1	35	4,2	1,7	55	1,9	55	0,2	0
12-13.06.86	3-7	4	56	1,2	1,4	75	0,5	80	0,9	5
13.06.86	3-7	2	265	1,9	3,8	298	0,7	285	3,1	13
13.06.86	3-7	4	265	2,6	2,6	279	1,9	277	0,7	2
18.06.86	3-7	1	22	5,8	1,2	13	1,8	32	0,6	19
3-4.06.87	5-7	2	90	4,0	1,5	84	3,3	100	1,8	16
4.06.87	5-7	2	112	3,5	3,4	158	2,9	125	0,5	33
25.09.87	3-5	1	190	6,0	2,4	180	1,7	170	0,7	10

Примечание: n — число скоплений; α , W — направление (град.) и скорость (м/с) ветра; V_{ϕ} , α_{ϕ} — фактические скорости (см/с) и направления (град.) перемещения скоплений; V_p , α_p — рассчитанные скорости (см/с) и направления перемещения скоплений; ΔV , $\Delta \alpha$ — абсолютная ошибка расчета скорости (см/с) и направления (град.) перемещения скоплений.

Таким образом, удовлетворительные, на наш взгляд, результаты тестирования лагранжевой модели движения позволяют сделать вывод о возможности ее использования для изучения особенностей переноса течениями гидробионтов как пассивных с точки зрения противодействия течениям (фитопланктон), так и активных мигрантов (зоопланктон, отдельные стан и скопления пелагических рыб, включая их молодь). Временной период применимости модели будет ограничиваться летним нагульным периодом для рыб, характеризующимся наибольшим развитием фито- и зоопланктона.

2.2.3. Блок «TURBIDITY». В настоящее время оценки влияния дополнительной мутности на экологию гидробионтов основываются на различных методах вычисления распространения пятен мутьевых вод, которые позволяют определить границы мутности, соответствующей предельно допустимым концентрациям, в зависимости от гранулометрического состава грунтов вскрыши и песчано-гравийной смеси, производительности и типа добывающего оборудования, скорости и направления

течения [12, 36]. Вместе с тем, не все из предлагаемых методов удобны в практическом применении и требуют использования набора эмпирических формул и номограмм, затрудняющих оперативный расчет границ пьен мутности.

В целях избежания указанных трудностей при расчете шлейфов мутевых вод (блок «TURBIDITY») использовалась плановая модель распространения взвешенных веществ в водоеме произвольной формы, основанная на решении уравнения единичного адвективного и турбулентного переноса вещества R_c (г/м²с) через вертикальную грань квадрата расчетной сеточной области [40]:

$$R_c = v_n C - D \frac{dC}{dn}, \quad (13)$$

где v_n — составляющая средней скорости течения (м/с), направленная по нормали к расчетной поверхности; C — концентрация взвешенного вещества (г/м³); D — коэффициент турбулентной диффузии (м²/с).

Составляющие интегральной скорости течения на гранях квадратов сеточной области вычислялись с помощью описанной выше стационарной гидродинамической модели (уравнения 1, 2). Расчет параметров течений проводился для каждой узловой точки, а содержание взвешенных веществ — для каждого квадрата сетки.

Коэффициент турбулентной диффузии принимался неизменным в пределах всего водоема и вычислялся исходя из масштаба сеточной области, по «закону 4/3» ($D = 0,264l^{4/3}$, где l — шаг сетки) [21]. В пределах каждого элемента сеточной области концентрация взвешенных веществ менялась только во времени. Расчетные зависимости строились конечно-разностным методом с соблюдением условий неразрывности и баланса вещества. Реализация данной схемы на компьютере позволяла отслеживать процесс распространения пьен вод повышенной мутности на фоне стационарного поля течений. Стабилизация поля мутности происходила при достижении баланса между приходом и расходом поступающего в водоем взвешенного вещества, когда изменения во времени концентрации взвесей не превышали заданных их отклонений от фоновой концентрации.

Начальная (дополнительная) концентрация взвешенных веществ C_n (г/м³), обусловленная работой добывающих устройств с разной технической производительностью, определялась по формуле [40]:

$$C_n = P' \rho_c m \gamma / Q_d, \quad (14)$$

где P' — техническая производительность устройства, м³/с; ρ_c — плотность смеси воды и грунта, кг/м³; m — число добывающих устройств; γ — коэффициент, характеризующий часть массы наносов, попадаемой в воду; Q_d — действующий расход как произведение действующей ширины (в нашем случае равной шагу сетки) на среднюю глубину в пределах расчетного элемента сетки и среднюю скорость течения на грани квадрата сетки, м³/с.

Совместный анализ результатов моделирования при соответствующих съемкам мутности гидрометеорологических условиях и натурных наблюдений на различных участках Рыбинского водохранилища показал, что распространение пятен вод повышенной мутности обуславливается структурой поля течений. Перемещение пятен происходит в направлении интегрального переноса вод. В зависимости от гидрометеорологических условий и начальной концентрации взвесей измеренная протяженность пятен по продольной оси изменяется от 700 до 1500 м, по поперечной оси — от 400 до 660 м, а площадь — от 0,29 до 0,86 км².

Рассчитанные характеристики пятен удовлетворительно согласуются с измеренными: средняя относительная погрешность по продольной оси достигает 16%, по поперечной оси — 13%, по площади — 18% и не превышает согласно [61] максимально допустимую погрешность измерений концентрации взвешенных веществ (25%) при естественных значениях мутности до 10 мг/л.

Полученные удовлетворительные результаты верификации рассмотренного метода позволяют достаточно эффективно использовать его при контроле размеров шлейфов вод повышенной мутности с учетом природоохранных требований, направленных на уменьшение ущерба биологическим ресурсам водоема.

Одна из программ («POLLUTION») является частью блока «TURBIDITY» и позволяет отслеживать на фоне стационарного скоростного поля нестационарный процесс распространения в водоеме растворенных веществ, поступающих в водоем со сточными водами бытового, промышленного и сельскохозяйственного происхождения и с водами выпадающих рек. Рассматривается перенос как консервативного, так и неконсервативного растворенного вещества.

Ввиду отсутствия у авторов данных по распространению шлейфов сточных вод от точечных источников на волжских водохранилищах, эта часть блока ПК не верифицировалась.

2.2.4. Блок «WAVE». К основным динамическим параметрам, характеризующим степень воздействия волнения на мелководье, относятся максимальные донные скорости в волновом потоке, глубины начала размыва донных отложений определенной крупности и режимные энергетические показатели (суммарная энергия и ее равнодействующая).

Изучение распределения параметров ветровых волн (высоты, длины, периода) проводилось с использованием расчетных методов А. П. Браславского [74], Н. А. Лабзовского [35] и СНиП [78], каждый из которых верифицировался по данным измерения высот волн 1% обеспеченности волномерными вехами и волномерами при установившемся волнении за период с 1955 по 1967 гг. в южной части Рыбинского водохранилища и приплотинном участке Иваньковского водохранилища. В результате было выявлено, что высоты волн, вычисленные по указанным выше методам, близки к измеренным при расхождении их средних значений, не превы-

пиающем погрешность приборов (табл. 2.5). В связи с этим при дальнейших расчетах был выбран метод Н. А. Лабзовского как наиболее удобный для программирования.

Таблица 2.5

**Фактические и рассчитанные высоты ветровых волн
в Рыбинском и Ивановском водохранилищах**

Характеристика	Водохранилище	
	Рыбинское	Иваньковское
Глубина в пункте измерений, м	3–6	5–9
Число членов ряда	174	21
Пределы измерения высоты волн, м:		
фактических	0,5–1,7	0,2–0,8
рассчитанных по методам:		
А. П. Браславского	0,55–1,7	0,2–1,0
Н. А. Лабзовского	0,45–1,6	0,2–0,95
СниП	0,55–1,55	0,25–1,1
Средняя высота волн, м:		
фактическая	0,9	0,35
рассчитанная по методам:		
А. П. Браславского	0,9	0,4
Н. А. Лабзовского	0,9	0,3
СниП	0,9	0,35
Абсолютная погрешность приборов, м	0,05	0,05

Метод позволяет рассчитывать параметры глубоководных и мелководных волн. Для учета мелководности участка вводятся коэффициенты, которые дают осредненную картину изменения высоты и длины волн на относительно пологом мелководье, соответствующем установившейся береговой отмели, сложенной легко перемещающимися грунтами, имеющими уклон в сторону водоема $\leq 0,01$ [35]. Рефракция волн при косом их подходе к береговой линии не учитывается. Высота и длина волн вычисляются как функции скорости ветра, разгона и крутизны волн.

Максимальные орбитальные скорости у дна в соответствии с линейной теорией Стокса вычисляются как функция высоты, периода поверхностных волн и глубины места [5].

Вследствие изменчивости волнения, связанной с непостоянством ветрового воздействия, для его описания нужен показатель, учитывающий как мощность, так и частоту явления. Такими свойствами обладают энергетические методы определения волнового режима. Энергетический

метод позволяет оценить общую энергию волновых движений в каком-либо районе водоема независимо от их направления. Расчет энергетических характеристик производится по формуле [70]:

$$E = \sum_{i=1}^m e_i, \quad e_i = \int_0^t \rho g h_i^2 b n \lambda / 8 T dt, \quad i = 1, \dots, m, \quad (15)$$

где ρ — плотность воды; g — ускорение силы тяжести; h_i , λ , T — высота, длина и период волны; b — ширина фронта волны; n , сут. — продолжительность волнения; m — число румбов ветра.

Второй составной частью данного блока является расчет скорости течения в мелководной зоне. Поскольку детально охарактеризовать формируемый ветром и волнами скоростной режим посредством натурных измерений — задача трудновыполнимая, а зачастую и нереальная, для оперативного и надежного получения данных о скорости течения на мелководье необходимы соответствующие расчетные зависимости. Достаточно полную характеристику скоростного режима может дать средняя на вертикали скорость течения, вычисляемая по формулам А. С. Судольского [79]:

$$V = 2,5 \cdot 10^{-2} (W \lambda / H)^{1/2}, \quad (16)$$

$$V = 2,5 \cdot 10^{-2} (W \lambda / H)^{1/2} \sin \alpha, \quad (17)$$

где W — скорость ветра на высоте 10 м; H — глубина; α — угол между направлением ветра и нормалью к линии берега.

Проверка формул (16, 17) осуществлялась по данным многосуточных регистраций скорости и направления течения на автономных буйковых станциях (АБС) в весенне-летний период 1975—1992 гг. в Волжском плесе и южной части Главного плеса Рыбинского водохранилища. При этом выбирались АБС с глубиной установки приборов (БПВ-2р, АЦИТ) $Z = 0,58H$, на которой, согласно А. С. Судольскому [79], измеренная скорость течения должна была отражать ее среднюю на вертикали величину. Кроме того, из исходных рядов выбирались значения скорости течения, соответствующие условиям установившегося ветрового воздействия.

Критерием сходства измеренных и рассчитанных средних на вертикали скоростей ветровых течений служили абсолютные погрешности измерительных приборов [45]. В результате верификации формул (16) и (17) было выявлено, что зависимость (16) в лучшей степени описывает среднюю по вертикали скорость течения с ошибкой, не превышающей погрешность приборов (табл. 2.6). Расчеты по формуле (16) позволяют получить скоростные характеристики течений в любой точке мелководной зоны без привлечения труднодоступной информации.

Таблица 2.6

**Фактические и рассчитанные скорости ветрового течения
на участках открытых мелководий Рыбинского водохранилища**

Характеристики	Глубина станции, м		
	3	6	2,5
Относительная глубина положения прибора	0,54	0,6	0,6
Число членов ряда	342	34	273
Пределы изменений скорости, см/с:			
фактической	4–14	4–11	4–17
рассчитанной по формулам:			
(16)	5–13	3–14	4–15
(17)	5–13	0–9	3–15
Средняя скорость, см/с:			
фактическая	7	5	8
рассчитанная по формулам:			
(16)	9	5	8
(17)	9	3	8
Абсолютная погрешность приборов, см/с	3	3	3

2.2.5. Блок «ВОТТАН». Модельный блок предназначен для выделения областей ветрового волнения, ветровых и стоковых течений по степени их воздействия на дно различных участков водоема [57]. Предлагаемый метод основан на рассмотрении критических тангенциальных донных напряжений с использованием понятия критической динамической скорости, соответствующей началу движения донных наносов [5]. Отношения фактических тангенциальных напряжений волновых потоков, ветровых и стоковых течений на дно мелководий к критическому тангенциальному напряжению служат критерием преобладающего проявления указанных видов движения воды в пределах мелководья, ограниченного глубиной $H > 0,5\lambda$ и урезом воды (прибойная и приурезовая зоны, где происходит разрушение волн и их взаимодействие с берегом, не выделяются).

Вычислительная процедура включает следующие этапы:

- расчет критических тангенциальных напряжений при конкретном типе донных отложений;
- вычисление максимальных значений удельных тангенциальных напряжений на дне волнового потока;
- вычисление максимальных тангенциальных напряжений на дне ветрового или стокового течения;

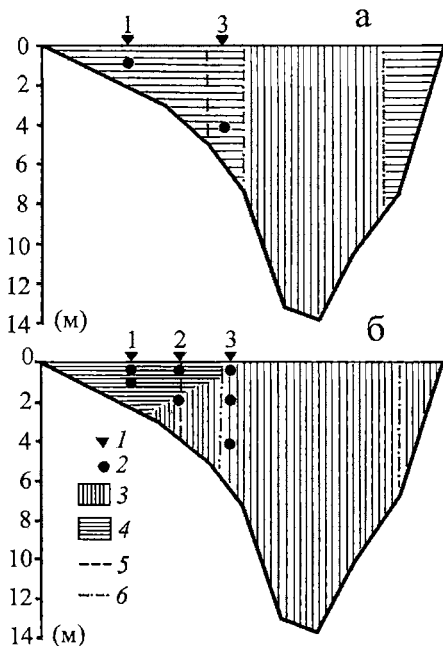


Рис. 2.2. Рассчитанные и фактические зоны преобладающего влияния ветрового волнения, ветровых и стоковых течений на гидрологическом разрезе в Волжском плесе Рыбинского водохранилища:

а — при северном ветре 6 м/с и расходах по Волге 1300 м³/с; б — при северном ветре 5 м/с и расходах по Волге 880 м³/с; 1 — АБС; 2 — горизонт измерения параметров течения; 3 — фактическая зона стокового течения; 4 — фактическая зона ветрового течения; 5 — внешняя граница рассчитанной зоны ветрового волнения; 6 — внешняя граница рассчитанной зоны ветрового течения

- вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке, ветровых и стоковых течениях к критическому тангенциальному напряжению;

- вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке, ветровых и стоковых течениях к суммарному напряжению по всем видам движения.

Из-за отсутствия натурной и модельной информации о степени воздействия ветрового волнения, ветровых и стоковых течений на дно мелководной зоны преобладающее влияние этих гидродинамических факторов условно определяется по их относительному вкладу, превышающему 50% (значения отношений более 0,5).

Апробация метода проводилась применительно к открытым мелководьям Волжского и Главного плесов Рыбинского водохранилища и припутьинного участка Иваньковского водохранилища. Расчет параметров ветровых волн осуществлялся по методу Н. А. Лабзовского [35]. Средняя по вертикали скорость ветрового течения в пределах открытых мелководий рассчитывалась по формуле (16). Расчет средней по вертикали скорости стокового течения выполнялся по стационарной модели однородного водоема [85].

Метод верифицировался на примере Волжского плеса Рыбинского водохранилища при различных гидрометеорологических условиях с учетом типа донных отложений, их механического состава и плотности. Сопоставление теоретически выделенных зон влияния ветрового волнения, ветровых и стоковых течений с фактически наблюдавшимися по данным измерения скоростей и направлений течений поплавками и на АБС выявили их удовлетворительную сходимость (рис. 2.2.).

Положительные результаты верификации изложенного метода позволили достаточно эффективно его применить для оценки распределения зон преобладающего влияния ветрового волнения и квазистационарных течений в пределах прибрежного мелководья отдельных плесов верхневолжских водохранилищ и дальнейшей классификации и характеристике участков мелководий по комплексу признаков.

2.2.6. Блок «PLANT». Назначение рассматриваемого блока — оценка динамических нагрузок на мелководные биоценозы. Рассчитав параметры волн в районе распространения гидробионтов и в зоне их отсутствия, можно установить предельные значения силового воздействия на высшую водную растительность и зообентос.

Для определения возможных нагрузок от волн на прикрепленные гидробионты использовалась методика [70, 78], в основу которой положен расчет волновых нагрузок на обтекаемые преграды, принятый в гидротехнике (СНиП-83). Применение расчетных методов возможно для объектов, поперечные размеры которых существенно меньше длины волны. В этом случае эффект отражения от объектов не оказывает заметного влияния на величину волновых нагрузок.

Максимальная сила от воздействия волн на стебель подного растения как на вертикальную обтекаемую преграду при глубине воды $H > H_{кр}$ ($H_{кр}$ — критическая глубина начала разрушения волн) рассчитывается по формуле [70, 78]:

$$Q_{\max} = Q_{i,\max} \delta_i + Q_{v,\max} \delta_v, \quad (18)$$

где $Q_{i,\max}$ и $Q_{v,\max}$ — инерционный и скоростной компоненты силы; δ_i и δ_v — коэффициенты сочетания инерционного и скоростного компонентов силы.

При малых поперечных размерах преграды (~ 5 мм), согласно [70], в уравнении (18) инерционным компонентом силы можно пренебречь. Тогда расчет Q_{\max} будет сводиться к определению скоростного компонента $Q_{v,\max}$ как функции от высоты и длины волны, диаметра преграды и глубины места.

Волновая нагрузка на зообентос — на лежащую на дне цилиндрическую преграду, диаметр которой $D \leq 0,1\lambda$ и $D \leq 0,1H$, рассчитывалась как максимальное значение равнодействующей линейной нагрузки:

$$P_{\max} = \sqrt{P_z^2 + P_t^2}. \quad (19)$$

Поскольку диаметр и длина отрезка цилиндрической преграды, согласно [70], принимались равными ~1 см, в расчетах учитывался только скоростной компонент нагрузки (см. главу III).

Проверка работоспособности метода осуществлена применительно к озерам Неро и Плещеево, Волжскому плесу Рыбинского водохранилища. В расчетах учитывались основные виды воздушно-водной растительности, включающие тростник, камыш озерный, рогоз, тростянку соответственно с диаметром стеблей 0,8; 1,0; 3,0 и 0,5 см. Картирование видов растительности и расчеты волновых нагрузок выполнены по квадратной сеточной области с шагом 250 м. В целом вычисления проведены по 306 квадратным участкам мелководной площадью 0,0625 км² каждый. Материалы по картированию отдельных видов макрофитов были любезно предоставлены В. Г. Папченковым.

Следует более подробно остановиться на подготовке информации для статистического анализа. Несмотря на достаточно длинные ряды наблюдений, ~ 100 пар значений по каждому водоему, коэффициенты корреляции между плотностью растений и волновым воздействием для исходных рядов получились незначительными. По нашему мнению, это связано с горизонтальными размерами водоемов (~9—19 км). Небольшие размеры озер и исследуемого участка Волжского плеса ограничивали максимальное воздействие штормовых волн при скорости ветра 15 м/с на тростник — до 4—5 (оз. Плещеево), камыш — от 6—8 (оз. Неро, Плещеево) до 15 (Волжский плес) и рогоз — до 20—25 Н (оз. Плещеево). Такие волновые нагрузки не приводили к гидродинамически обусловленному исчез-

новению растений — большие их плотности наблюдались как при малых, так и при максимальных нагрузках. Вместе с тем, отмечалось явное различие в распределении плотности макрофитов в прибрежной зоне по периметру водоемов. Поэтому была применена процедура сглаживания рядов исходных данных. Ряды плотности растений разбивались на градации в соответствии с методикой [25]. По каждой градации плотности считалась средняя волновая нагрузка.

В результате корреляционного анализа трансформированных рядов для каждого водного объекта были получены уравнения линейной регрессии, описывающие зависимость плотности тростника и рогоза, как более чувствительных к волновым нагрузкам, а также суммарной плотности растений от силы волнового воздействия (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Статистическая оценка результатов расчета

Водоем, растение	Уравнение регрессии	n	F	r	e	Диапазон Q
Оз. Неро						
Рогоз	$P = 43 - 1,8Q_p$	13	153	-0,96	$\pm 2,9$	0—23
Σ_p	$P = 39 - 2,1Q_\Sigma$	13	37	-0,88	$\pm 4,9$	0—18
Оз. Плещеево						
Тростник	$P = 5,8 - 1,3Q_{тр}$	8	7	-0,74	$\pm 1,8$	0—4,5
Рогоз	$P = 10 - 0,6Q_p$	12	47	-0,92	$\pm 1,5$	0—16
Σ_p	$P = 46 - 7,9Q_\Sigma$	12	33	-0,89	$\pm 8,0$	0—5,8
Волжский плес						
Тростник	$P = 92 - 11,9Q_{тр}$	10	28	-0,79	$\pm 7,6$	0—7,7
Σ_p	$P = 143 - 15,7Q_\Sigma$	12	54	-0,92	$\pm 7,4$	0—9

Примечание: Σ_p — суммарная плотность растений, шт./м²; P — плотность растений, шт./м²; $Q_{тр}$, Q_p , Q_Σ — сила воздействия на стебель растения: тростника, рогоза и суммарная соответственно, Н; n — число членов ряда; F — критерий Фишера; r — коэффициент корреляции; e — ошибка расчетов.

Интерпретируя результаты статистического анализа, можно сказать, что на данном этапе исследований не удалось найти общего для всех рассмотренных водных объектов уравнения регрессии, связывающего плотность водных растений как одного вида, так и их суммарную плотность с волновыми нагрузками.

Получение такой унифицированной зависимости вероятно возможно в будущем на основе более обширного ряда наблюдений по зарастанию водосмов разного типа с привлечением других гидрологических параметров (температуры, уровня воды и т. д.) и учетом биологических особенностей растений. В этом, на наш взгляд, заключается главное ограничение изложенного метода.

Отсутствие необходимых данных не позволило в настоящее время установить корреляционные зависимости между количественными характеристиками зообентоса и воздействием ветровых волн и тем самым провести верификацию той части программного блока, которая ответственна за расчет динамических нагрузок на прикрепленные донные гидробонты.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ КОМПЛЕКСА

3.1. Организация работы в программном комплексе

Все программы комплекса работают в едином информационном пространстве, т. е. при обработке расчетной сетки какого-либо одного водоема выходные файлы одних программ являются входными для других. Схема информационных потоков представлена на рис. 3.1. Названия ряда файлов даны в кавычках, что означает неизменность имени всего файла или его части. Так, например, файл глубин водоема для программ блока «FFF» имеет произвольное имя (желательно, с расширением .h), а в другие программы идет этот же файл с постоянным именем H. На схеме указаны имена программ, реализующих алгоритмы соответствующих блоков программного комплекса (рис. 2.1.)

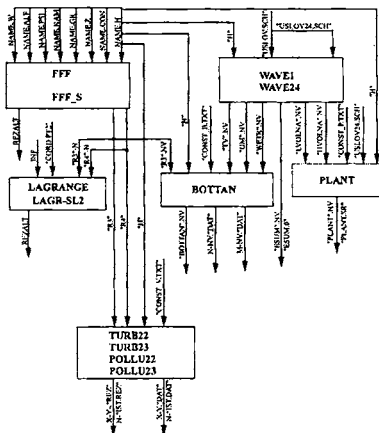


Рис. 3.1. Схема информационных потоков программного комплекса

Рекомендуется все исполняемые файлы программ поместить в один каталог, например, «D:/exe», и в меню запуска указать путь к задачам в этот каталог. В текущем же каталоге должны находиться все входные файлы для исполняемой программы с именами в соответствии со схемой на рис. 3.1. В этот каталог записываются и файлы результатов.

3.2. Программы блока «FFF»

3.2.1. Алгоритм расчетов. Программа реализует алгоритм численного решения уравнения Пуассона для функции полных потоков

(ФПП), уравнений компонентов скорости течения и понижения уровня (6) при реальном контуре мелководного водоема, при стационарных неравномерных ветровых условиях.

Для численного решения задачи водоем покрывается квадратной сеткой с шагом Δx (м) по обеим осям. Размерность сетки $M \times N$, где M — количество строк по оси Y , N — количество столбцов по оси X (рис. 3.2).

Ограничения на объем массивов: N не более 100, $M \times N$ не более 4000. Нумерация точек сквозная от 1 до $M \times N$ по строкам начинается с левого нижнего угла сетки. Точки могут быть внутренними, где глубина $H > 0$, внешними ($H = 0$) или жидкими границами ($H < 0$). Расчет всех характеристик производится на каждом горизонте только во внутренних точках.

Для численного решения уравнений (1) в каждой внутренней

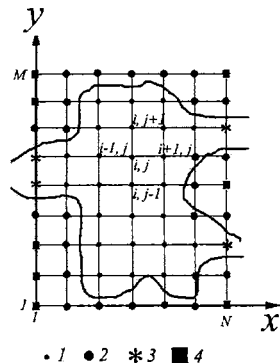


Рис. 3.2. Пример построения расчетной сеточной области водоема:
1 — внутренние точки, 2 — точки граничного контура, 3 — точки жидких границ, 4 — внешние точки

ной точке i, j производные, входящие в уравнения, заменяются разностными отношениями:

$$\psi_{ij} = \frac{A_1}{C} \psi_{i+1,j} + \frac{A_2}{C} \psi_{i-1,j} + \frac{A_3}{C} \psi_{i,j+1} + \frac{A_4}{C} \psi_{i,j-1} - 2k\Delta x \frac{D_{ij}}{C}. \quad (20)$$

Здесь:

$$A_1 = \frac{1}{H^{i+\frac{1}{2},j}}, \quad A_2 = \frac{1}{H^{i-\frac{1}{2},j}}, \quad A_3 = \frac{1}{H^{i,j+\frac{1}{2}}}, \quad A_4 = \frac{1}{H^{i,j-\frac{1}{2}}},$$

$$C = A_1 + A_2 + A_3 + A_4,$$

$$D_{ij} = W_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij} \left(\frac{1}{H^{i+\frac{1}{2},j}} - \frac{1}{H^{i-\frac{1}{2},j}} \right) - W_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \left(\frac{1}{H^{i,j+\frac{1}{2}}} - \frac{1}{H^{i,j-\frac{1}{2}}} \right),$$

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)_{ij} = - \frac{3W_{ij}\gamma}{4kgH_{ij}^2} \cdot \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2\Delta x} - \frac{3\gamma W_{ij}^2 \cos \alpha_{ij}}{2\rho g H_{ij}}, \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)_{ij} = \frac{3W_{ij}\gamma}{4kgH_{ij}^2} \cdot \frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2\Delta x} - \frac{3\gamma W_{ij}^2 \sin \alpha_{ij}}{2\rho g H_{ij}}, \quad (22)$$

$$u_{ij} = \frac{4kW_{ij} \cos \alpha_{ij}}{H_{ij}} (H_{ij} - Z) + \frac{2gk}{\gamma W_{ij} H_{ij}} (H_{ij}^2 - Z^2) \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)_{ij}, \quad (23)$$

$$v_{ij} = \frac{4kW_{ij} \sin \alpha_{ij}}{H_{ij}} (H_{ij} - Z) + \frac{2gk}{\gamma W_{ij} H_{ij}} (H_{ij}^2 - Z^2) \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)_{ij}. \quad (24)$$

Здесь W_{ij} — модуль скорости ветра в точке ij , а α_{ij} — угол между осью Y и направлением ветра, отсчитываемый по часовой стрелке.

Поправкой ΔA можно корректировать положение сетки относительно севера (ось Y) для более точной аппроксимации контура водосема. Остальные обозначения см. в главе II (уравнение (1)).

Для решения уравнения (20) применяется итерационный процесс Либмаина:

$$\psi_{ij}^{(n+1)} = \frac{A_1}{C} \psi_{i+1,j}^{(n)} + \frac{A_2}{C} \psi_{i-1,j}^{(n)} + \frac{A_3}{C} \psi_{i,j+1}^{(n)} + \frac{A_4}{C} \psi_{i,j-1}^{(n)} - 2k\Delta x \frac{D_{ij}}{C}, \quad (25)$$

где n — номер итерации.

Положим $\psi_{ij}^{(0)} = 0$, тогда $\psi_{ij}^{(1)} = -2k\Delta x \frac{D_{ij}}{C}$.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока во всех внутренних точках не будет выполняться условие:

$$\left| \frac{\psi_{ij}^{(n+1)} - \psi_{ij}^{(n)}}{\psi_{ij}^{(n-1)}} \right| < 0,001$$

По составляющим u_{ij} и v_{ij} получаем модуль вектора скорости течения и его угол относительно оси X на соответствующем горизонте:

$$V_{ij} = \sqrt{u_{ij}^2 + v_{ij}^2}, \quad \text{tg } \alpha_{ij} = \frac{v_{ij}}{u_{ij}}, \quad (26)$$

а также вертикальную составляющую скорости течения:

$$w_{ij} = \frac{H-Z}{2\Delta x} \sum (u_{i+1,j} - u_{i-1,j} + v_{i,j+1} - v_{i,j-1}), \quad (27)$$

где суммирование ведется по горизонтам: $\frac{Z_0 + Z_1}{2}, \dots, \frac{Z_{n-1} + Z_n}{2}$.

Осредненные по вертикали (интегральные) векторы переноса воды \bar{V}_{ij} вычисляются как среднеарифметические его составляющих u_{ij} и v_{ij} на заданных горизонтах, т. е. расчет этих параметров течения может быть осуществлен в любом слое водной толщи.

В программе выделяются зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса воды. Процедура выделения заключается в следующем. В качестве реперного значения модулей векторов интегрального переноса воды (V) выбирается среднее их вариационного ряда: V_{cp} — для нормального распределения и $\ln(V_{cp})$ — для логнормального. Формулы расчета экстремумов скоростей интегрального переноса воды имеют вид:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= V_{cp} + z_\gamma \sigma, \\ V_{\min} &= V_{cp} - z_\gamma \sigma, \\ V_{\max} &= \exp(\ln V_{cp} + z_\gamma \sigma), \\ V_{\min} &= \exp(\ln V_{cp} - z_\gamma \sigma), \end{aligned} \quad (28)$$

где z_γ — стандартная нормальная переменная при заданном уровне вероятности γ [25].

Применение z_γ в качестве множителя σ в формулах (28) позволяет классифицировать значения скоростей не только по признаку отклонения от среднего, но и задать значение вероятности встречи этих величин в пределах водоема.

В качестве значений z , нами были выбраны следующие: 0,8416 и 1,2816 при соответствующих уровнях вероятности 0,8 и 0,9 ($\gamma = 0,2$ и $\gamma = 0,1$). Значение z , для каждого рассматриваемого водоема выбиралось таким образом, чтобы горизонтальные размеры аномалий скорости соответствовали мезо — (до 10 км) и крупномасштабным (10—100 км) динамическим явлениям в озерах и водохранилищах [86]. Так, например, для Рыбинского водохранилища, исходя из его размеров, принималось значение z , равное 0,8416, а для оз. Плещеево — 1,2816, способствующее уменьшению области аномалий.

В процессе моделирования вычисляются статистические характеристики поля скоростей на каждом горизонте: среднее арифметическое, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, ошибка среднего, показателя асимметрии и эксцесса с их ошибками, минимальное и максимальное значения скорости течения.

3.2.2. Исходные данные и работа программы. Два варианта программ реализуют некоторые разные входные и выходные данные.

Имя программы	Слои	R3, R4	Преобладающие ψ , V	Файлы GRA
«FFF»	1	сохраняются	считаются	выводятся всегда
«FFF_S»	до 8	не сохраняются	не считаются	выводятся по запросу

За одно обращение к программе производится расчет характеристик циркуляции воды по одному варианту ветровых условий и притока в водоем. По набору вариантов рассчитываются значения преобладающих ФПП и характеристик течения.

Файлы исходных данных готовятся в любом редакторе и, в принципе, могут иметь произвольные имена. Рекомендуется давать файлам одно и то же имя, мнемонически соответствующее имени водоема, а расширенные — отражающее содержание файла.

1. Файл значений глубин H (м) в узловых точках сетки вводится матрицей $M \times N$, инвертированной по отношению к сетке, т. е. значение глубины первой точки (левая нижняя на сетке) должно быть первым значением в матрице (левая верхняя в матрице) и т. д. по строкам.

Значение значения глубин задаются только во внутренних точках, что является признаком расчета в этих точках всех характеристик. Глубина во внешних и граничных точках равна 0, кроме точек жидких границ, где осуществляется условие свободного протекания, т. е. простой перенос ФПП из соседней точки. Здесь ставится значение глубины согласно схеме:

- $H_j = -1$., если жидкие границы на сетке слева,
- $H_j = -2$., если жидкие границы на сетке сверху,
- $H_j = -3$., если жидкие границы на сетке справа,
- $H_j = -4$., если жидкие границы на сетке внизу.

Значения глубин в половинных точках вычисляются как среднеарифметические глубин соответствующих узловых точек, за исключением точек жидких границ, где половинные глубины равны узловым.

Файл глубин содержит в первой строке в скобках значение формата записи согласно правилам Фортрана. Далее в файле идут десятичные (с точкой) значения глубин — M строк по N чисел в каждой строке. Ниже следующие примеры представления данных и результатов относятся к образцу сеточной области рис. 3.2.

Файл глубин PRIMER.H:

(7F6.1)

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0
0.0	0.0	1.0	2.0	2.0	0.0	0.0
-1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0
-1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1.0	2.0	2.0	2.0	-3.0
0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2. Файл начальных значений расходов ψ ($\text{м}^3/\text{с}$) задается матрицей аналогично массиву глубин. Значащие значения расходов заносятся только в точках твердых границ. В остальных точках числовые значения обязательно должны быть, но могут иметь любую величину, например, нуль. В первой строке указывается значение формата записи, далее информация формируется, как в файле глубин. Например, файл PRIMER.PSI:

(7F6.0)

0.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	0.0
0.0	150.0	0.0	0.0	0.0	150.0	0.0
0.0	150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	30.0	30.0
0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	0.0

Значения расходов на твердой границе заносятся таким образом, чтобы большие их значения оставались справа относительно направления поступления в водоем вод притока.

3. *Файлы ветровых условий* задаются в каждой внутренней точке сетки двумя массивами $M \times N$ — значениями скоростей ветра W м/с и его направлениями α град. В остальных точках — нули. Если поле ветра однородно над всей поверхностью водоема (задается ключом в диалоговом окне), то в эти файлы вводится по одному значению, которое затем программно распространяется по всей сетке.

Направление ветра задается в градусах и в программе корректируется на величину поправки «DA» с последующим переводом в радианы.

Файлы ветровых условий формируются аналогично файлу глубин.

Пример файлов с однородным полем ветра:

PRIMER.W

(F5.1)

4.5

PRIMER.ALF

(F5.0)

180.

4. *Файл вектора глубин горизонтов Z* (м) содержит значения глубин, на которых производится расчет характеристик течений. Вектор начинается с 0.0 для нулевого горизонта. Горизонты, не участвующие в вычислении модуля и направления интегрального вектора скорости (V, α_v), вводятся со знаком минус (например, -0,001, — если надо исключить нулевой горизонт; -2,0 — если исключается горизонт 2 м).

Файл горизонтов содержит в первой строке формат записи типа «F», определяющий запись файла в виде вектора-столбца или вектора-строки, и значения горизонтов. Например:

(5F5.1)

0.0 1.0 -2.0 -3.0 -4.0

или

(F5.1)

0.0

1.0

-2.0

-3.0

-4.0

В приведенном примере расчет ведется по всем горизонтам, но осредненные векторы переноса воды V_{θ} будут вычислены для слоя 0,0—1,0 м.

5. *Файл вектор-столбец номеров точек жидких границ* содержит целые значения номеров точек, расположенных на жидких границах, в сквозной нумерации.

Файл PRIMER.GR:

21

29
36
49

6. **Файл констант** содержит постоянные для каждого водоема величины в следующем порядке и формате:

целые	[M – число строк сетки
		N – число столбцов сетки
		IGR – число точек сетки на жидких границах (длина вектора GR)
		IZ – число горизонтов, включая отрицательные (длина вектора Z)
]	ITER – число итераций
с десятичной точкой	[GAM = $3,25 \cdot 10^{-6}$
		HAG – шаг сетки Δx
		KF – ветровой коэффициент вязкости
		G = 9,81
		DA – поправка угла направления ветра

Например, файл PRIMER.CON:

9
7
4
2
2000
0.325E-5
100.
0.016
9.81
0.

7. **Файл имен** содержит имена всех файлов в следующем обязательном порядке:

файл констант
файл глубин
файл горизонтов
файл жидких границ
файл скоростей
файл направлений
файл начальных значений расходов.

Например, файл PRIMER.NAM:
PRIMER.CON
PRIMER.H
PRIMER.Z
PRIMER.GR
PRIMER.W
PRIMER.ALF
PRIMER.PSI

Подготовленные 7 файлов исходных данных должны быть помещены в текущий каталог.

С запроса имени файла имен файлов начинается счет в программе. Открывается диалоговое окно для формирования условий счета данного варианта циркуляции (ДВЦ) воды.

8. В диалоговом окне нужно указать:

- а) имя файла имен файлов;
- б) имя файла результатов счета (в текущем каталоге открывается текстовый файл с этим именем);
- в) название набора вариантов циркуляций — вводить обязательно, даже если считается один вариант (если будет считаться набор вариантов, то в текущем каталоге будут созданы два бесформатных файла с этим именем и с расширениями .PSI и .UV для накопления результатов предыдущих вариантов);
- г) равномерное поле ветра — набрать Y (y), если в файлах xxx.W и xxx. ALF задано по одному значению, иначе набрать N (n);
- д) строить области минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса данного варианта (Y,y) или нет (N,n);
- е) повторяемость ДВЦ в процентах с десятичной точкой, если будет считаться набор вариантов (см. п. 8 в); повторяемость последнего варианта задается со знаком минус, что является признаком окончания набора и расчета преобладающих значений, для расчета только одного варианта, вне набора, повторяемость равна 0;
- ж) отклонение от нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища (для озера всегда равно нулю).

Для программы FFF_S.EXE далее запрашиваются:

- з) количество слоев;
 - н) граничные глубины горизонтов для каждого слоя из файла xxx.Z, с точкой через запятую (например: 0.,1.5 «ENTER»; 1.5,2. «ENTER» и т. д.).
- Если набор условий выполнен правильно, нужно ответить Y(y), иначе — N(n) для исправления. Курсор ставится на первую строчку диалога (п. 8а). В случае правильного ответа на запрос переход к следующему вопросу осуществляется стрелками, а не клавишей «Enter», которая обнуляет значение запрашиваемой величины.

По окончании диалога начинается ввод данных с выдачей сообщений на экран. В случае обнаружения ошибки (чаще всего это неравенство массивов величине $M \times N$) происходит выход из программы.

После правильного ввода данных начинается счет. При этом:

- вычисляются массивы глубин в половинных точках,
- производится их коррекция на величину отклонения от горизонта (п.8 ж),

- в случае равномерного поля ветра (п.8г) первое значение W и α распространяется на всю сетку,

- производится коррекция углов и перевод их в радианы,

- начинается итерационный процесс вычисления ФПП в каждой внутренней точке ($H > 0$), перенос ФПП на жидкие границы, если они есть, проверка на сходимость процесса в каждой расчетной точке до 0.001. В случае если все точки удовлетворяют параметру сходимости, процесс заканчивается с записью значений ФПП в формате сетки в файл результатов (п.8б). Если процесс еще не закончен, но количество заданных шагов итераций исчерпано, то вводится дополнительное число итераций.

При расчете набора ДВЦ производится вычисление частных ФПП в зависимости от коэффициента повторяемости варианта и накопление их в бесформатном файле xxx.PSI (п.8 в) с дальнейшим расчетом преобладающих ФПП.

По полученным значениям ФПП в каждой внутренней точке вычисляются значения уклонов по осям и их равнодействующей.

На каждом горизонте для каждой внутренней точки, где глубина больше 0, производятся следующие действия:

- вычисляются составляющие u и v , модуль вектора скорости течения V_z , угол его направления α_z , скорректированный на DA и переведенный в градусы,

- рассчитываются статистические характеристики модуля вектора скорости течения,

- происходит накопление составляющих u и v на положительных горизонтах для вычисления модуля вектора интегрального переноса воды,

- вычисляются интегральные вектора переноса воды \bar{V} ,

- выделяются зоны минимальных и максимальных значений модуля вектора интегрального переноса воды соответственно выбранному уровню значимости, если в диалоговом окне (п.8 д) было указано «Y»,

- рассчитывается вертикальная составляющая скорости течения (для наглядности умножается на 10^4),

- если коэффициент повторяемости ДВЦ, введенный в п.8в), не равен 0, вычисляются частные составляющие u и v с учетом коэффициента повторяемости и происходит их накопление для дальнейшего вычисления преобладающих u_{np} и v_{np} в наборе,

- производится вывод модуля и направления вектора скорости течения на каждом горизонте в файлы GRA*** и в файл результатов соответственно для построения векторной схемы течений и распечатки их числовых характеристик.

Если считается последний вариант набора (коэффициент повторяемости с минусом (п.8в), то в файл результатов выводятся значения преобладающих в данном наборе ФПП, модуля и направления векторов переноса воды, выделяются зоны минимальных и максимальных значений модуля вектора.

3.2.3. Результаты расчетов. В результате счета одного варианта в текущем каталоге формируются следующие файлы:

- текстовый файл результатов с именем, задаваемым п.8б;
- два файла с расширениями .PSI и .UV и именем, задаваемым в п.8в, для накопления, (можно удалить по окончании счета *всего* набора);
- бесформатные файлы R3, R4, содержащие модули и направления интегральных векторов переноса воды (в случае расчета набора ДВЦ — это модуль и направление преобладающего вектора интегрального переноса воды), которые используются в дальнейшем в работе программ «LAGRANGE», «BOTTAN» и др.;
- файлы GRA*** для построения схем течений на заданных горизонтах в программах, аналогичных «SURFER». Файл GRA990 всегда содержит параметры векторов интегрального переноса воды;
- файл GRAPSI, содержащий координаты внутренних точек и значения функции ψ в них, для построения изолиний функций в пакете «SURFER».

В текстовый файл результатов в формате сетки водоема записываются:

- значения функций полных потоков,
- статистика скоростей течения на каждом горизонте,
- значения модулей и направлений векторов интегрального переноса воды,
- выделенные зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса воды, если задан ключ «Y» в п.8д,
- значения вертикальной составляющей скорости течения, умноженной на 10^4 ,
- значения модулей и направлений векторов скорости течения на каждом горизонте.

Пример файла результатов расчета по сетке рис. 3.2.:

```
#####
#
#          Расчет функций полных потоков          #
#    и параметров ветровых течений по стационарной модели    #
#      Фельзенбаума для мелководного водоема      #
#              выполнен в ИБВВ РАН              #
#
#####
```

исходная информация:

*****СЧИТАЕТСЯ НАБОР с POV= .00*****

Поле ветра равномерное

4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50 4.50
 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00 180.00

Отклонение от горизонта $DH = .00$

Функции полных потоков PSI

	1	2	3	4	5	6	7
9		30	30	30	30	30	30
8		30	32	30	28	30	30
7		30	35	30	17	15	15
6	49	49	49	24	0		
5	125	125	100	45	2		
4		150	146	99	23		
3		150	151	134	104	78	78
2		150	151	149	146	150	
1		150	150	150	150	150	

Статистика N внутренних точек на горизонтах Z

Z	N	ср.	дисп.	ср. кв. откл.	вар.	ош. ср.	асимм	ош. асимм	экс.	ош. экс.	мин.	макс.
.0	25	25.7	305.9	17.5	.7	3.5	.27	.45	-1.5	.73	2.23	56.3
1.0	14	27.1	176.95	13.3	.5	3.6	-.186	.55	-1.62	.78	7.04	44.16

Разнодействующая средней по вертикали интегральной скорости и ее направление:

	1	2	3	4	5	6	7
9	"	"	"	"	"	"	"
8		"	8.1 208	4.1 180	12.1 127		"
7	"	"	14.9 241	3.7 31	9.3 77	10.1 102	
6	"	31.3 265	22.1 284	14.4 339	15.8 46		
5	"	33.6 279	39.4 306	38.4 320	31.7 328		
4		"	49.6 309	47.6 322	44.6 312		
3		"	6.3 318	20.9 308	43.4 291	49.5 277	"
2			6.2 170	12.3 255	35.8 257	"	"
1	"	"	"	"	"		

Поле вертикальной интегральной скорости

KR=1.005

ТОЧКИ // <= MIN(10.80) ТОЧКИ ## >= MAX(37.61) УРОВЕНЬ ЗНАЧИМОСТИ
.8416

	1	2	3	4	5	6	7
9	""	""	""	""	""	""	""
8	""	""	//	//		""	""
7	""	""		//	//	//	""
6	""					""	""
5	""		##	##		""	""
4	""	""	##	##	##	""	""
3	""	""	//		##	##	""
2	""	""	//			""	""
1	""	""	""	""	""	""	""

Средняя вертикальная составляющая скорости течения (умножать на 10^{-4})

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8							
7				-456	1020		
6			448	-641			
5			1718	951			
4				-2161			
3				-461	-512		
2							
1							

РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ И НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ
НА .0-м ГОРИЗОНТЕ

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8		8.1	4.1	12.1			
		208	180	127			
7		14.9	2.2	10.5	13.0		
		241	102	99	120		
6	36.3	24.5	12.6	15.8			
	258	275	333	46			
5	37.9	42.7	40.7	31.7			
	273	302	317	328			
4		49.6	51.3	48.4			
		309	320	308			
3		6.3	21.6	48.3	56.3		
		318	300	287	272		
2		6.2	12.3	35.8			
		170	255	257			
1							

РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ И НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА 1.0-м ГОРИЗОНТЕ

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8							
7			7.0 13	9.8 53	8.8 75		
6		26.7 247	20.3 296	16.2 344			
5		29.7 287	36.3 312	36.1 325			
4			44.2 326	41.1 316			
3			20.7 317	38.9 297	43.1 282		
2							
1							

3.3. Программы блока «LAGRANGE»

3.3.1. Алгоритм расчетов. Программа реализует Лагранжеву модель движения точки или группы точек по вычисляемому в блоке «FFF» полю скоростей и направлений течения.

Координаты отслеживаемой точки на каждом временном шаге вычисляются по известным значениям координат и составляющих скорости течения на предыдущем шаге по формулам (9).

Набор координат (x^0, y^0) , $(x^1, y^1), \dots, (x^n, y^n)$ определяет траекторию отдельной точки. Если точка находится между узлами сетки (x, y) , интерполяция значений составляющих $u_{x,y}$ и $v_{x,y}$ производится методом простой линейной интерполяции из четырех соседних точек, т. е. с первым порядком точности по схеме:

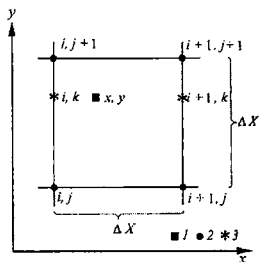


Рис. 3.3. Схема четырехточечной интерполяции вектора скорости в произвольной точке внутри узлов сеточной области:

1 — интерполируемая расчетная точка;
2 — узлы сеточной области; 3 — промежуточные расчетные точки

$$\begin{aligned}
u_{x,y} &= u_{i,k} + \frac{x - x_{i,j}}{\Delta x} (u_{i+1,k} - u_{i,k}), \\
u_{i,k} &= u_{i,j} + \frac{y - y_{i,j}}{\Delta x} (u_{i,j+1} - u_{i,j}), \\
u_{j+1,k} &= u_{i+1,j} + \frac{y - y_{i+1,j}}{\Delta x} (u_{i+1,j+1} - u_{i+1,j}), \\
v_{x,y} &= v_{i,k} + \frac{x - x_{i,j}}{\Delta x} (v_{i+1,k} - v_{i,k}), \\
v_{i,k} &= v_{i,j} + \frac{y - y_{i,j}}{\Delta x} (v_{i,j+1} - v_{i,j}), \\
v_{i+1,k} &= v_{i+1,j} + \frac{y - y_{i+1,j}}{\Delta x} (v_{i+1,j+1} - v_{i+1,j}).
\end{aligned} \tag{29}$$

Предполагается, что точки перемещаются только под действием ветрового течения без учета вязкости жидкости и диффузии. Реализовано два варианта программы расчета.

В первом варианте программы («LAGRANG») точки движутся в одном слое. В процессе счета можно моделировать изменение ветровых условий во времени, вводя поочередно до десяти вариантов соответствующих полей скорости течения. По окончании расчетов выдаются значения итогового пути, скорость и направление перемещения точек.

Во втором варианте программы («LAGR-SL2») в скорость течения вносится поправка на собственную скорость перемещения гидробионтов (рыб, зоопланктона). Учитываются суточные вертикальные миграции организмов, т. е. возможность их реверсивного перемещения из верхних в нижние слои. Задается время дрейфа планктона и рыб в каждом слое. Переход из слоя в слой предполагается скачкообразным. Если в результате перемещения в первом слое точка на момент перехода во второй слой оказывается вне этого слоя («выходит на сушу»), то принимается, что она продолжает дрейфовать в соответствии с ветровым течением первого слоя.

3.3.2. Исходные данные и работа программы. Входные файлы для программы «LAGRANG» указаны на рис. 3.1. Файлы R3, R4 с модулями и направлениями интегральных векторов переноса воды, полученные в блоке «FFF», переименовываются в R3-п, R4-п, где п — двух-

позиционный номер варианта ветровых условий в порядке ввода в счет. При использовании только одного варианта ветра (расчета) назначаются имена файлов R3—1 и R4—1.

Информационный файл условий счета программы, имя которого запрашивается при запуске программы, имеет следующие строки:

«M», «N», «HAG.», где «M» — число M строк сетки водоема,
«N» — число N столбцов сетки водоема,
«HAG.» — шаг сетки Δx ;

«NVAR» — число вариантов ветра;

«TVAR1.»

«TVAR2.»

... реальное время ввода очередного варианта с десятичной точкой;

«TVARN.»

«TMAX.», «DT.», «TPRN.», где «TMAX.» — максимальное время счета в часах, «DT.» — шаг по времени в часах, «TPRN.» — интервал времени выдачи результата в часах;

«NTOCH» — количество точек;

«NC», «XC.», «YC.», где «NC» — номер точки, «XC.», «YC.» — ее координаты x, y на сетке в метрах.

Например:

54,66,30.

4

1.

11.

25.

35.

48.,1.,10.

4.,

1,1920.,30.

2,1860.,30.

3,1800.,30.

4,1740.,30.

Информационный файл для программы «LAGR-SL2» отличается от первой программы только тем, что в первой строке появляется собственная скорость гидробионта: «M», «N», «HAG.», «SS.». Остальная информация набирается в указанной выше последовательности.

Для построения контура водоема в текущем каталоге должен быть файл CORDPT2 с координатами точек контура: первая строка — количество точек контура, вторая строка и далее — номера столбца и строки контура по 3 позиции на каждое число или через запятую. Например:

99

66 1

66 7
65 7
65 11

.....

После запуска программы в интерактивном режиме запрашиваются имя информационного файла условий счета и имя файла результатов. Остальные входные файлы должны быть в текущем каталоге. Во время счета на экран выдаются текущее время счета, шаг и время печати, схема водоема с траекториями точек или пятна.

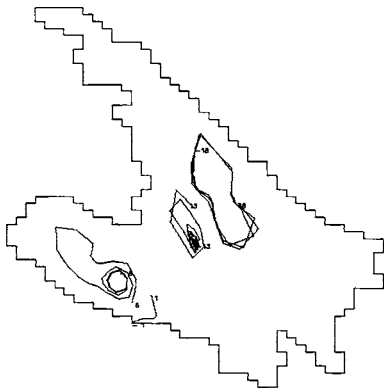
Для того, чтобы запомнить полученную графическую схему в файл, нужно при появлении на экране картинки нажать клавишу «Print Screen», а по окончании работы вызвать пакет «WORD» и восстановить картинку нажатием клавиш «CNTRL-V».

В файл результатов записываются:

- координаты точек x_u через каждые TPRN часов;
- путь (м), скорость (м/ч) и направление (град.) каждой точки на конечный момент времени.

3.3.3. Результаты расчетов. Приведем пример расчета перемещения четырех точек по Рыбинскому водохранилищу.

Этому рисунку соответствует следующий текстовый файл результатов:



REZ5

МАКС. ВРЕМЯ СЧЕТА 4320.00 ч ШАГ ПО ВРЕМЕНИ 1.00 ч
ВЫДАЕТСЯ КАЖДЫЙ 100.00 Ч

ТОЧКИ	1		6		13		18	
T	X м	Y м	X м	Y м	X м	Y м	X м	Y м
.0	30000.	26000.	26000.	24000.	38000.	52000.	48000.	52000.
100.0	31009.	20273.	26608.	27243.	35185.	55987.	52211.	44810.
200.0	30497.	19363.	26777.	30394.	34052.	46590.	48270.	38980.
300.0	29262.	19501.	25717.	33325.	38630.	36612.	44761.	40752.
400.0	27853.	19147.	24945.	35039.	40922.	39777.	43309.	46391.
500.0	27122.	18810.	22311.	35656.	40185.	44991.	42410.	50109.
.....								
4000.0	26002.	18292.	21515.	28200.	38670.	41148.	41502.	54820.
4100.0	26002.	18291.	22961.	26839.	39418.	40058.	40811.	55287.
4200.0	26002.	18291.	24734.	27722.	39170.	41672.	39318.	56097.
4300.0	26001.	18291.	24978.	30554.	38846.	40649.	38736.	60098.
4400.0	26001.	18291.	23485.	32909.	39427.	40545.	39038.	67802.

ДЛЯ 1-й ТОЧКИ:

$S = 8684. \text{м}$, $V = 2.0 \text{м/ч}$, $ALFA = 207.$

ДЛЯ 6-й ТОЧКИ:

$S = 9257. \text{м}$, $V = 2.1 \text{м/ч}$, $ALFA = 344.$

ДЛЯ 13-й ТОЧКИ:

$S = 11543. \text{м}$, $V = 2.7 \text{м/ч}$, $ALFA = 173.$

ДЛЯ 18-й ТОЧКИ:

$S = 18167. \text{м}$, $V = 4.2 \text{м/ч}$, $ALFA = 330.$

3.4. Программы блока «TURBIDITY»

3.4.1. Алгоритм расчетов. В основе алгоритма расчета полей концентрации взвешенного или растворенного в водоеме вещества лежит изложение в Гл. 2 плановая модель переноса примеси [40]. В процессе моделирования водоем делится на расчетные элементы. Для каждого элемента записываются уравнения неразрывности и баланса вещества. Численное решение уравнений производится для всей совокупности элементов водоема.

Условлено, что расчетным элементом i, j водоема считается квадрат сетки с шагом Δx , используемой для расчета функций полных потоков (блок «FFF»). В каждом узле сетки задаются значения глубины и вычисленные в программе «FFF» модули и направления вектора интегрального переноса воды.

Грани a, b, c, d каждого элемента перпендикулярны водной поверхности и упираются в дно водоема. В пределах каждого элемента концентрация вещества S неизменна в пространстве и может меняться лишь во

времени. По узловым значениям глубин и скоростей вычисляются средние значения глубин каждой грани H_{ij} , квадрата в целом H_{ij} , средние значения скоростей, нормальных к каждой грани V_j .

Для записи дифференциального уравнения диффузии в декартовых координатах сетка водоема располагается так, чтобы основное направление течения было параллельно оси X . Поскольку выполнение этого условия зависит от конфигурации водоема и ветровых условий, необходимо задавать угол поворота сетки на угол $\Delta\beta$ в соответствии с преобладающим направлением течения (рис. 3.5).

Установлено, что наиболее адекватное решение получается в случае преобладающего однонаправленного течения в водоеме. Тогда вычисляемая, например, для грани «а» средняя, нормальная к этой грани, составляющая скорости течения $V_a = \bar{V} \cos \alpha$ будет положительна, если ее направление совпадает с осью X , и отрицательна, если противоположна ей. Расход воды через грань «а» $q_a = V_a \Delta x H_a$ будет иметь знак, соответствующий знаку скорости течения через эту грань. Аналогичные вычисления проводятся и для других граней. Положительные значения расходов для граней «а» и «с» означают приток воды и вещества в элемент i, j , а отрицательные — отток. Для граней «в» и «д» положительные значения расходов означают отток, а отрицательные — приток воды и вещества. При стационарном режиме течений уравнение неразрывности для элемента i, j будет иметь вид:

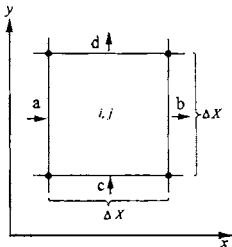


Рис. 3.4. Обозначение граней расчетного элемента (стрелками указано направление переноса воды)

$$q_{ja} - q_{jb} + q_{jc} - q_{jd} = 0. \quad (30)$$

Координаты i, j расчетного элемента задаются координатами i, j левого нижнего узла этого квадрата сетки.

При составлении уравнения баланса вещества расходы вещества через каждую грань вычисляются как произведение единичного переноса вещества на площадь этой грани. Например, для положительной скорости течения V_{ja} расход вещества через грань «а» записывается как:

$$q_{sja} = [V_{ja}^* S_{i-1,j} - D(S_{ij} - S_{i-1,j})] / \bar{H}_{ja} \Delta x, \quad (31)$$

где V_{ja}^* — положительная составляющая скорости течения, нормальная к грани «а»; S — текущая концентрация вещества в квадрате i, j сетки; D — коэффициент турбулентной диффузии.

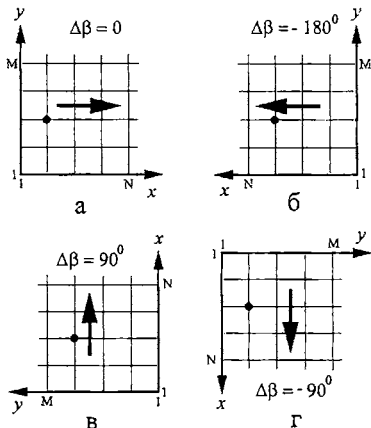


Рис. 3.5. Схема разворота сеточной области в зависимости от направления преобладающего переноса воды (точка — расчетный узел, стрелка — перенос воды)

Все расходы q_{sy} должны быть отнесены к определенному моменту времени $t^k = \Delta t \cdot k$, все интервалы времени постоянны — $\Delta t = \text{const}$.

Уравнение баланса вещества в конечно-разностной форме записывается следующим образом:

$$S_{ij}^{k+1} = S_{ij}^k + (q_{Sija}^k - q_{Sjib}^k + q_{Sjic}^k - q_{Sjia}^k) \cdot \Delta t / (\bar{H}_{ij} \Delta x^2) \quad (32)$$

или

$$S_{ij}^{k+1} = S_{ij}^k + \varphi_{ija}^k - \varphi_{jib}^k + \varphi_{jic}^k - \varphi_{jia}^k,$$

где $\varphi_{ija}^k = q_{Sija}^k \Delta t / (\bar{H}_{ij} \Delta x^2)$.

Аналогичная запись производится и для других граней. Здесь φ имеет размерность концентрации и выражает ее изменение в расчетном элементе за время Δt в результате действия источника поступления вещества.

Если источником загрязнения является сброс взвешенных частиц, то к базовому уравнению (32) добавляется функция осаждения вещества:

$$\varphi_{\text{ос}}^k = 1.2 U_n (S_{ij}^{k-1} + \varphi_{ja}^k - \varphi_{jb}^k + \varphi_{jc}^k - \varphi_{jd}^k) \quad (33)$$

где U_n — гидравлическая крупность взвешенных частиц (м/с).

Если растворенное загрязняющее вещество поступает непосредственно в расчетный элемент водоема со сточными водами (подобие сточной трубы), то к базовому уравнению (32) добавляется функция:

$$\varphi_{\text{ст}}^k = Q_{\text{ст}} S_{\text{ст}}^k \Delta t / (\bar{H}_{ij} \Delta x^2), \quad (34)$$

где $Q_{\text{ст}}$ — расход стока в расчетный квадрат; $S_{\text{ст}}^k$ — средневзвешенная концентрация вещества в стоке.

Учет крупных притоков, приносящих растворенные загрязняющие вещества в расчетный элемент через жидкую границу, происходит добавлением к базовому уравнению (32) функции φ_{np} той грани квадрата, через которую поступает приток. Например:

$$\varphi_{\text{нр}}^k = Q_{np} S_{np}^k \Delta t / (\bar{H}_{ij} \Delta x^2). \quad (35)$$

Расход реки Q_{np} , воды которой поступают в расчетный элемент через грань на жидкой границе, вычисляется через скорость, нормальную к этой грани квадрата. Например, для грани «а»:

$$Q_{npa} = V_{ja} \Delta x \bar{H}_{ja}. \quad (36)$$

В базовом уравнении (32) функция φ соответствующей грани заменяется функцией φ_{np} этой грани. Например, $\varphi_{ja}^k = \varphi_{\text{нр}}^k$.

Процесс снижения концентрации растворенного неконсервативного вещества учитывается в модели введением в базовое уравнение (32) функции неконсервативности $\varphi_{нк}$:

$$\varphi_{\text{нк}}^k = k_n S_{ij}^k \Delta t. \quad (37)$$

Коэффициент неконсервативности равен:

$$k_n = (1 - S_{np} / S_{\text{фон}}) / T_{\text{гс}}, \quad T_{\text{гс}} = Q_w / Q_b, \quad (38)$$

где Q_w — расчетный объем водоема при среднем многолетнем уровне (м^3); Q_b — средний за расчетный период расход воды в водосток, вытекающем из водоема ($\text{м}^3/\text{с}$).

Функция $\varphi_{нк}$ всегда отрицательна.

Таким образом, общее расчетное уравнение модели для получения

генерализованной схемы распределения в водоеме загрязняющих веществ имеет вид:

$$S_{ij}^{k+1} = S_{ij}^k + \varphi_{jo}^k - \varphi_{jb}^k + \varphi_{jc}^k - \varphi_{jd}^k - \varphi_{jos}^k + \varphi_{jcm}^k + \varphi_{jnp}^k + \varphi_{jnk}^k. \quad (39)$$

В зависимости от вида источника загрязнения соответствующие члены уравнения могут обращаться в нуль.

По базовой формуле (32) производится расчет поля концентраций в каждом внутреннем квадрате сетки (где $H_{ij} \neq 0$) на момент времени $k+1$, начиная с $k_0 = \Delta t$ до выхода задачи на стационарный режим, когда во всех точках расчета разность между концентрациями на текущем и предыдущем шагах станет меньше установленного критерия сходимости (в программе — 0,01): $|S_{ij}^{k+1} - S_{ij}^k| \leq 0,01$, или при достижении установленного максимального времени счета T_{\max} .

Если в квадрате рассчитанное значение концентрации S_{ij}^{k+1} становится отрицательным или меньше величины $(S_{фон} + CR)$, то $S_{ij}^{k+1} = S_{фон}$, где CR равен соответственно 0,25 и 0,75 мг/л для водоемов I (высшей) и II категорий [12, 46].

Существенное значение в процессе моделирования имеет адекватный выбор шага по времени Δt . Причем для оценки максимально допустимой величины Δt берется квадрат, на гранях которого наблюдаются наибольшие компоненты скорости V_r [40]:

$$\Delta t = 0,5 \bar{H} \Delta x / \sum_1^m |V_r \bar{H}_r|. \quad (40)$$

Суммирование произведений компоненты скорости V_r на среднюю глубину грани \bar{H}_r ведется для тех m граней, на которых компонента скорости направлена из элемента.

3.4.2. Исходные данные и работа программ. Расчет поля концентраций взвешенной и растворенной примеси производится, в зависимости от характера источника загрязнения и его работы, по нескольким программам.

	Взвешенное загрязняющее вещество	Растворенное неконсервативное вещество
Включение—отключение одного источника	«TURB-22»	«POLLU-22»
Несколько постоянных источников	«TURB-23»	«POLLU-23»

Программы «TURB» вычисляют установившееся поле концентраций взвешенных веществ в водах повышенной мутности с учетом их осажде-

ния. Входные информационные файлы обозначены на рис. 3.1. В интерактивном режиме в каждой программе запрашиваются некоторые параметры счета, такие как угол поворота сетки, шаг счета по времени, координаты источника, концентрация загрязняющего вещества в нем и т. д., при вводе которых нужно соблюдать формат требуемых чисел (с точкой или без точки).

Рекомендуется:

— поворачивать сетку водоема так, чтобы основной поток был направлен по оси X ;

— сначала вычислить шаг по времени, чтобы определить максимально возможное его значение, а затем, начиная с меньшего, например с 50 с, увеличивать, пока поле концентраций взвешенных веществ не стабилизируется и дальнейшее увеличение шага не будет менять картину их распределения;

— время вывода промежуточного расчета на экран делать кратным шагу счета DT .

При вычислении координат X, Y квадрата источника необходимо учитывать заданный поворот сетки и задавать X, Y в новой системе координат. На экран выводится текущее поле концентраций через каждые $TPRN$ секунд и запрашивается, сохранять ли его в файле результатов. Концентрация в источнике остается постоянной во всех случаях, кроме стока с твердой границы непосредственно в расчетный элемент. При запросе координат такого источника нужно задавать координаты X, Y этого расчетного элемента.

На каждом шаге по времени осуществляется перенос значений концентрации вещества на жидкую границу из соседних квадратов для выполнения условия свободного протекания жидкости.

Информационный файл «CONST_V.TXT» содержит три строки.

В первой « M » — число строк сетки водоема, « N » — число столбцов, « HAG » — шаг сетки водоема (м);

Во второй « S » — фоновая концентрация (мг/л), « D » — коэффициент турбулентной диффузии (m^2/c), « DT » — шаг счета по времени (с), « $TMAX$ » — максимальное время счета (с), « $TPRN$ » — шаг выдачи счета на экран (с), « CR » — критерий ошибки;

В третьей — « Un » — гидравлическая крупность твердых частиц (см/сек) (равна нулю, если не учитывать осаждение частиц), « Sn » — концентрация частиц крупностью « UN » (мг/л).

Например:

39,15,125.	— M, N, HAG
6.,7.,300000.,1000.,0.25	— $S, D, TMAX, TPRN, CR$
0.0003345,100.	— Un, Sn

Остальные условия счета запрашиваются с экрана при работе конкретной программы. Счет прекращается, когда общее время включения (отключения) источника достигает « $TMAX$ », или при достижении уровня

сходимости во всех точках, или заданием «0» при запросе с экрана координат очередного источника или времени включения—отключения.

Программа «TURB-22» позволяет получить поле концентраций взвешенных веществ от одного точечного источника загрязнения с включением (отключением) его на задаваемые интервалы времени. По окончании обработки одного источника программа предлагает задать координаты другого источника или осуществить из нее выход. На каждый источник загрязнения создается пара текстовых файлов результатов $X-Y.REZ$ и $X-Y.DAT$ (X и Y — координаты источника). В файл $X-Y.REZ$ записываются поля концентраций в определенные моменты времени. Файл $X-Y.DAT$ используется для построений изолиний поля в пакете «SURFER».

Программа «TURB-23» строит поле концентраций взвешенных веществ при источниках, работающих одновременно без отключения. Количество источников N ограничено только количеством внутренних квадратов сетки с ненулевой средней глубиной. Результаты записываются в два текстовых файла $N-IST.REZ$ и $N-IST.DAT$.

Программы «POLLU» рассчитывают распространение растворенной неконсервативной примеси, поступающей или со сточными водами на твердой границе непосредственно в расчетный элемент или с притоком реки через жидкую границу. Здесь учитываются функции неконсервативности вещества, стока и притока. Перенос вещества из соседних с жидкой границей квадратов осуществляется только в тех квадратах, где идет сток реки.

Информационный файл для программ «POLLU» тоже $CONST.V.TXT$, только третья строка в нем не используется, а в первой строке добавляется переменная «GS», указывающая, какая граница является стоком реки. «GS2 = -1., -2., -3., или -4., согласно принятым обозначениям в матрице глубин программы «FFF» (см. 3.2.2 пункт, 1). Для программы «TURB» наличие или отсутствие этой переменной не имеет значения, т.к. перенос осуществляется на всех жидких границах. Общие условия и рекомендации для этих программ те же, что для программ «TURB».

Для учета неконсервативности вещества запрашивается значение $T_{\text{ус}}(с)$, вычисляемое по формуле (38). Если источник — сточные воды, запрашивается значение расхода $Q_{\text{см}}(м^3/с)$. Для притока $Q_{\text{см}} = 0$.

Файлы результатов формируются так же, как в программах «TURB».

3.4.3. Результаты расчетов. Пример файла результатов для речного участка Волжского плеса Рыбинского водохранилища, с поворотом сетки на 90 град.

Координаты источника: $x = 14, y = 8$.

Фоновая концентрация $S_{\text{фон}} = 6 \text{ мг/л}$, концентрация в источнике $S = 100 \text{ мг/л}$. Через 3000 с работы источника получается такая картина распределения концентраций загрязняющего вещества:

T = 3000

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
15												
14												
13										6		
12								6	6	6		
11				12.07	11.77	9.47	7	6	6	6	6	
10	6	9.7	16.64	26.15	24.92	210.5	15.89	11.37	7.95	6	6	6
9	6	9.9	19.94	42.73	40.99	33.48	24.04	16.07	10.25	6.26	6	6
8	6	9.44	23.86	100	68.88	47.44	31.1	19.14	11.57	6.92	6	6
7	6	8.4	16.75	44.46	45.6	36.06	25.08	15.64	9.76	6	6	6
6	6	6	10.66	21.18	22.65	18.76	13.81	8.79	6	6	6	6
5	6	6	6	8.9	9.4	8.04	6	6	6	6	6	6
4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
2			6	6	6	6	6	6	6	6	6	
1												

3.5. Программы блока «WAVE»

3.5.1. Алгоритм расчетов. Расчет высоты, длины и периода ветровых волн на глубокой воде проводится для каждого узла сеточной области с шагом сетки Δx (м) соответственно по формулам [35]:

$$h_0 = 0,0172KW\sqrt{D}, \quad (41)$$

$$\lambda_0 = 0,319W\sqrt{D}, \quad (42)$$

$$T_0 = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_0}{g}}, \quad (43)$$

где K — энергетический коэффициент, $K = 1 + 0,75e^{-1,568 \frac{D}{W^2}}$; W — скорость ветра (м/с); $D = \Delta x \cdot n \cos \alpha + \Delta D$ — разгон волны (км) от береговой линии до расчетной точки (n — число шагов от наветренного берега в направлении α действия ветра, ΔD — расстояние от береговой линии в км в направлении действия ветра до расчетного полигона, $\Delta D = 0$, если расчет производится по всей сетке). Разгон вычисляется в программе для 8 румбов ветра — $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ и 360° .

На мелководье расчетные формулы имеют вид:

$$h_m = h_0 \beta_m, \quad (44)$$

$$\lambda_m = \lambda_0 \alpha_m, \quad (45)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_m}{g}}, \quad (46)$$

где $\alpha_m = 1,185(H/\lambda_0)^{0,44}$ и $\beta_m = 1,065(H/\lambda_0)^{0,28}$ суть эмпирические зависимости, полученные для H/λ_0 в интервале $0,05 \div 1$.

Максимальная донная волновая скорость на мелководье вычисляется по формуле:

$$U_m = \frac{2\pi h_m}{T_m e^a - T_m e^{-a}}, \quad (47)$$

где $a = \frac{2\pi H}{\lambda_m}$.

Волновая энергия для одного румба ветра и суммарная волновая энергия для 8 румбов ветра при трех вариантах скорости каждого румба рассчитываются соответственно по формулам:

$$E = \frac{105840 h_m^2 \lambda_m K T}{T_m}, \quad (48)$$

$$\sum_{i=1}^3 \left(\sum_1^{45^\circ} + \dots + \sum_1^{360^\circ} \right) + \dots + \left(\sum_3^{45^\circ} + \dots + \sum_3^{360^\circ} \right),$$

где KT — продолжительность волнения (сутки).

Горизонтальная U_x и вертикальная W_z составляющие скорости орбитального движения частиц воды в волне на горизонте z_i вычисляются по формулам:

$$U_{xi} = \frac{2h_m}{T_m} \frac{ch\left(2\pi \frac{H-z_i}{\lambda_m}\right)}{sh\left(2\pi \frac{H}{\lambda_m}\right)}, \quad (49)$$

$$W_{zi} = \frac{2h_m}{T_m} \frac{sh\left(2\pi \frac{H-z_i}{\lambda_m}\right)}{sh\left(2\pi \frac{H}{\lambda_m}\right)}.$$

Для расчета средней на вертикали скорости ветрового течения используется формула (16) А. С. Судольского [79]:

$$V_s = 0.025 \sqrt{\frac{W \lambda_m}{H}}. \quad (50)$$

Размерности вычисляемых характеристик волн и течений следующие: $h_0, h_m, \lambda_0, \lambda_m$ — (м); T_0, T_m — (с); U_m, U_{x1}, U_{x2}, V_s — (м/с); E, E_x — (Дж/м).

3.5.2. Исходные данные и работа программ. Алгоритм реализован двумя программами. Программа «WAVE1» подробно вычисляет параметры ветрового волнения для одного румба ветра, учитывая поправки к уровню воды и разгону ветра, вертикальную и горизонтальную составляющие скорости орбитального движения частиц воды в волне на разных горизонтах, с осреднением по слою, скорость ветрового течения по формуле (50).

Программа «WAVE24» вычисляет суммарную волновую энергию для 24 вариантов ветровых условий, ее равнодействующую и направление. Соответственно различаются входные и выходные файлы этих программ (рис. 3.1).

Информационный файл USLOV.SCH для программы «WAVE1» содержит следующие строки:

«M», «N», «STROK», «HAG.», DUR., где «M», «N» — размерность сетки; «STROK» — количество строк с параметрами ветра; «HAG.» — шаг сетки (м); «DUR.» — отклонение уровня водоема от горизонта, от нормального подпорного уровня (НПУ), (м);

«NZ» — количество расчетных горизонтов; NZ = 0, если не нужно вычислять вертикальную и горизонтальную составляющие скорости орбитального движения частиц воды;

«Z.» — значения горизонтов (м). Если «NZ»=0, то значения «Z.» отсутствуют. Положительные значения «Z.» обозначают горизонты, по которым производится осреднение характеристик для слоя;

«NV.», «RUMB.», «W.», «KT.» — строка параметров ветра, где «NV.» — номер варианта ветровых условий (вариант счета), «RUMB.» — направление ветра (град.), «W.» — скорость ветра (м/сек), «KT.» — продолжительность волнения (сутки). Всего «STROK» строк.

Например:

30,20,4,100.,0.

5.

-1.

2.

3.

4.

-5.

- 1.,360.,4.,2.
- 2.,360.,12.,3.
- 3.,270.,4.,1.
- 4.,270.,12.,2.

В приведенном примере осреднение будет проводиться по горизонтам 2, 3 и 4 м.

Работа программы осуществляется следующим образом. В интерактивном режиме запрашиваются номер варианта счета «NV», поправка « ΔD ». По запросу вычисляется скорость течения по формуле (50). После обработки одного варианта счета программа предлагает задать следующий вариант или закончить счет.

В информационном файле USLOV24.SCH для программы «WAVE24» количество строк с параметрами ветра в показателе «STROK» всегда 24 и, по сравнению с файлом USLOV.SCH, отсутствуют вторая и следующие («NZ») строки, где помещена информация о расчетных горизонтах. Начиная со второй строки файла «USLOV24.SCH», в 24 последующих строках дается информация о 24 вариантах ветровых условий — для 8 румбов ветра (45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° и 360°) с тремя скоростями ветра по каждому румбу в таком же формате, как и в файле USLOV.SCH.

Например:

```
30,20,24,100.,0.
1.,45.,5.,5.
2.,45.,10.,3.
3.,45.,15.,1.
4.,90.,5.,4.
5.,90.,10.,2.
6.,90.,15.,1.
7.....
.....
.....
24.,360.,15.,0.5.
```

3.5.3. Результаты расчетов. В результате обработки каждого варианта счета по программе «WAVE» выводится текстовый файл ESUM.NV, содержащий в формате сетки водоема значения высоты, длины и периода волны, максимальную донную скорость течения, энергию волн, скорость ветрового течения по формуле (50), горизонтальную и вертикальную составляющие скорости орбитального движения частиц воды и их осредненное значение в слое.

Пример файла результатов вычисления параметров волны для расчетной сетки на рис 3.2.

VARIANT RUMB = 180.0 W = 5.0

Высота волны (м)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.12	.12	.12		
7			.12	.12	.12	.05	
6		.07	.11	.11	.11		
5		.05	.10	.10	.10		
4			.09	.09	.09		
3			.07	.07	.07	.05	
2			.05	.05	.05		
1							

Длина волны (м)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			1.4	1.4	1.4		
7			1.3	1.5	1.5	.6	
6		.8	1.3	1.3	1.3		
5		.6	1.2	1.2	1.2		
4			1.0	1.0	1.0		
3			.8	.8	.8	.6	
2			.6	.6	.6		
1							

Период волны (с)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.9	.9	.9		
7			.9	1.0	1.0	.6	
6		.7	.9	.9	.9		
5		.6	.9	.9	.9		
4			.8	.8	.8		
3			.7	.7	.7	.6	
2			.6	.6	.6		
1							

Максимальная донная скорость (м/с)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.009	.009	.009		
7			.007	.000	.000	.000	
6		.000	.000	.000	.005		
5		.000	.000	.000	.004		
4			.002	.000	.000		
3			.000	.000	.000	.000	
2			.000	.000	.000		
1							

Энергия волн/1000000 (дж/м)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.00	.00	.00		
7			.00	.00	.00	.00	
6		.00	.00	.00	.00		
5		.00	.00	.00	.00		
4			.00	.00	.00		
3			.00	.00	.00	.00	
2			.00	.00	.00		
1							

Скорость ветрового течения по формуле (16) (м/с)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.07	.07	.07		
7			.06	.05	.05	.03	
6		.04	.05	.05	.06		
5		.03	.04	.04	.06		
4			.06	.04	.04		
3			.05	.04	.04	.03	
2			.04	.04	.04		
1							

Бесформатные файлы включают: HVOLNA.NV — высоты волн; LVOLNA.NV — длины волн; TV.NV — периоды волн; UM.NV — максимальные донные скорости; VVETR.NV — среднюю по вертикали скорость ветрового течения. Указанные файлы используются как входные в других блоках комплекса.

Текстовый файл UXWZZDAT.NV, содержащий координаты точек и значения рассчитанных параметров U_x и W_z , может быть использован для их графических построений в пакете «SURFER».

В результате работы программы «WAVE24» формируется текстовый файл ESUM.0, в котором в формате сетки записываются суммарная энергия волн, умноженная на 10^{-6} , равнодействующая энергии всех румбов, умноженная на 10^{-6} , и ее направление.

3.6. Программы блока «BOTTAN»

3.6.1. Алгоритм расчетов. В программе «BOTTAN.FOR» производится расчет максимальных и критических тангенциальных напряжений на дно мелководий в волновых потоках и течениях, их отношений и выделение областей преобладающего влияния на дно мелководий ветрового волнения, ветровых и стоковых течений.

Критическое тангенциальное напряжение на дно водоема записывается в виде [5]:

$$U_{*cp}^2 = 9,8d_{cp}(S-1)\theta_{cp}. \quad (51)$$

Здесь $S = \rho_s / 1000$, ρ_s — плотность грунта (кг/м^3), d_{cp} — средний диаметр частиц донного грунта (м), θ_{cp} — зависит от $D_* = d_{cp} 10^4 \sqrt[3]{9,8S}$:

$$\theta_{cp} = 0,14(D_*)^{-1} \quad \text{при } D_* \leq 4,$$

$$\theta_{cp} = 0,14(D_*)^{-0,66} \quad \text{при } 4 < D_* \leq 10,$$

$$\theta_{cp} = 0,04(D_*)^{-0,1} \quad \text{при } 10 < D_* \leq 20,$$

$$\theta_{cp} = 0,013(D_*)^{0,29} \quad \text{при } 20 < D_* \leq 150,$$

$$\theta_{cp} = 0,055 \quad \text{при } D_* > 150.$$

Максимальное тангенциальное напряжение на дне волнового потока выражается [5]:

$$U_{*m}^2 = f \cdot U_m^2 / 2, \quad (52)$$

где $f = \exp(5,213 \cdot (k_s / a_\delta)^{0,194} - 5,977)$ при $k_s / a_\delta < 0,63$,
 $f = 0,3$ при $k_s / a_\delta \geq 0,63$,
 $k_s = 2,5 \cdot d_{cp}$, $a_\delta = U_m / 2\pi \cdot T_m$, а U_m и T_m — максимальная донная скорость и период волны на мелководье, рассчитанные в блоке «WAVE».

Максимальное тангенциальное напряжение на дне ветрового течения вычисляется по формуле [5]:

$$U_{*a}^2 = V_a^2 / (2,5 \cdot \ln(4 \cdot H / d_{cp} + 1))^2, \quad (53)$$

где V_a — скорость ветрового течения по формуле (50) (файл «VVETR» из блока «WAVE»).

Максимальное тангенциальное напряжение на дне стокового течения рассчитывается по формуле [5]:

$$U_{*c}^2 = V_c^2 / (2,5 \cdot \ln(4 \cdot H / d_{cp} + 1))^2, \quad (54)$$

где V_c — скорость стокового течения (файл R3 из блока «FFF»).

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

$$N_1 = \frac{U_{*m}^2}{U_{*kp}^2}, \quad N_2 = \frac{U_{*e}^2}{U_{*kp}^2}, \quad N_3 = \frac{U_{*c}^2}{U_{*kp}^2}. \quad (55)$$

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

$$M_1 = \frac{U_{*m}^2}{\Sigma}, \quad M_2 = \frac{U_{*e}^2}{\Sigma}, \quad M_3 = \frac{U_{*c}^2}{\Sigma}, \quad (56)$$

где $\Sigma = U_{*m}^2 + U_{*e}^2 + U_{*c}^2$.

3.6.2. Исходные данные и работа программ. Входные файлы для программы указаны на рис. 3.1. Информационный файл CONST_B.TXT содержит две строки:

«M», «N», «KR3», где «M», «N» — размерность сетки, «KR3» = 1, если есть стоковое течение (в этом случае данные берутся из файла «R3»);

«ROS», «DSR», где «ROS» — плотность донного грунта (кг/м³), а «DSR» — средний диаметр его частиц (м).

Например:

```
12,15,0
2500.,.000003
```

В интерактивном режиме программа запрашивает номер варианта расчета (ветровых условий «NV»), для которого уже произведены вычисления по программам «WAVE» и «FFF». Все входные файлы — TV.NV, UM.NV, VVETR.NV и R3.NV — располагаются в текущем каталоге.

3.6.3. Результаты расчетов. В результате работы программы формируются следующие текстовые файлы:

– BOTTAN.NV, содержащий в формате сетки значения N_1 , N_2 , N_3 (см. формула (55)), которые при величине >1 обозначаются любыми символами, например (****), и позволяют выделить области эрозии дна в результате воздействия того или иного вида движения воды, а также значения M_1 , M_2 , M_3 отношений (56), при величине которых $>0,5$ звездочками выделяются области преобладающего действия волн, ветрового или стокового течения;

M-NV.DAT и N-NV.DAT содержат ту же информацию в виде, пригодном для построения изолиний характеристик в пакете «SURFER»:

X	Y	N_1	N_2	N_3
2.0	2.0	.0	.0	.0
3.0	2.0	.0	.0	1.0
4.0	2.0	.0	.0	1.0
5.0	2.0	.0	.0	1.0
6.0	2.0	.0	.0	.0

Пример расчетов для расчетной сетки на рис. 3.2.

N1, ** отмечены значения > 1.

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.01	.01	.01		
7			.00				
6				.00			
5				.00			
4			.00				
3							
2							
1							

N2, ** отмечены значения > 1.

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.01	.01	.01		
7			.01	.01	.01	.00	
6		.00	.00	.00	.01		
5		.00	.00	.00	.01		
4			.01	.00	.00		
3			.01	.00	.00	.00	
2			.01	.01	.01		
1							

N3, ** отмечены значения > 1.

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			**	**	**		
7			**	**	**	**	
6		**	**	**	**		
5		**	**	**	**		
4			**	**	**		
3			**	**	**	**	
2			**	**	**		
1							

M1, ** отмечены значения > 0.5

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.00	.00	.00		
7			.00				
6				.00			
5				.00			
4			.00				
3							
2							
1							

M2, ** отмечены значения > 0.5

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.00	.00	.00		
7			.00	.00	.00	.00	
6		.00	.00	.00	.00		
5		.00	.00	.00	.00		
4			.00	.00	.00		
3			.00	.00	.00	.00	
2			.00	.00	.00		
1							

M3, ** отмечены значения > 0.5

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			**	**	**		
7			**	**	**	**	
6		**	**	**	**		
5		**	**	**	**		
4			**	**	**		
3			**	**	**	**	
2			**	**	**		
1							

3.7. Программы блока «PLANT»

3.7.1. Алгоритм расчетов. Максимальная сила воздействия волны на стебель водного растения рассчитывается по формуле [70, 78]:

$$Q_{\max} = 9800/12ah_m^2\alpha_v, \quad (57)$$

где a — диаметр стебля (м); h_m — высота волны на мелководье (м); $\alpha_v = 1,995 - 0,903 \ln(H/\lambda_m) - 0,572 \ln(\lambda_m/h_m)$ — скоростной коэффициент глубины (при $H/\lambda_m = 0,1 \div 0,5$ и $\lambda_m/h_m = 8 \div 40$).

Волиовая нагрузка на зообентос вычисляется по выражению:

$$P_{\max} = \sqrt{(P_x^2 + P_z^2)}, \quad (58)$$

где $P_x = 307,72(h_m^2/\lambda_m)\theta_v$; $\theta_v = -0,3937 + 0,0548(\lambda_m/h_m)$ при $\lambda_m/h_m = 8 \div 15$, а $P_z = -1,8P_x$.

3.7.2. Исходные данные и работа программы. Информационный файл CONST_P.TXT содержит одну строку с параметрами «M», «N» сетки (рис. 3.1).

Например:

12,15

Информационный файл USLOV24.SCH содержит параметры ветровых условий, при которых производится расчет. В первую строку заносится количество строк с вариантами ветра, в следующих строках находятся параметры (см. также программу «WAVE»): «NV.» — номер варианта; «RUMB.» — направление ветра (град); «W.» — скорость ветра (м/с); «КТ.» — продолжительность действия ветра (сутки).

Например:

```
7
1.,225.,4.,6.
2.,225.,14.5,6.
3.,360.,4.,6.
4.,360.,14.5,6.
5.,360.,6.,6.4
6.,360.,11.,0.33
7.,45.,2.,10.3
```

В интерактивном режиме программа запрашивает номер варианта ветра «NV», для которого производится расчет. Причем, для этого варианта ветра должны быть уже проведены вычисления по программе «WAVE» и сформированы в текущем каталоге входные файлы HVOLNA.NV и LVOLNA.NV.

В программе предусмотрен расчет максимальной волновой нагрузки при действии ветра одного румба или средней максимальной волновой нагрузки с учетом действия ветра по нескольким румбам. В связи с этим, программа запрашивает повторяемость заданного варианта ветра «POV.» (%), а затем — диаметр стебля водного растения, пределы по Q_{\max} и P_{\max} . Для одного варианта ветра («POV»=0) можно рассчитывать Q_{\max} и P_{\max} задавая разные диаметры стебля растения. В случае набора румбов ветра расчет ведется только для одного диаметра стебля водного растения. При этом повторяемость последнего варианта набора ветровых условий задается с минусом как признак окончания набора вариантов.

3.7.3. Результаты расчетов. В результате работы программы формируются следующие текстовые файлы:

— PLANT.NV (или PLANT.SR) в формате сетки содержит Q_{\max} и P_{\max} , причем их значения, большие предельных, заменяются любыми символами, например (****).

Пример расчетов по сетке рис. 3.2:

*****Диаметр стебля A= 3.000000E-02*****

Максимальная сила воздействия волны на стебель водного растения
(** отмечены значения > 5.000000)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			.3	.3	.3		

7	.3	.1	.1
6	.1	.1	.2
5	.0	.0	.2
4	.1		
3	.1		
2	.0	.0	.0
1			

Максимальная волновая нагрузка на бентос (** > 5.000000)

	1	2	3	4	5	6	7
9							
8			1.6	1.6	1.6		
7			1.5	1.7	1.7	.7	
6		1.0	1.5	1.5	1.5		
5		.7	1.4	1.4	1.4		
4			1.2	1.2	1.2		
3			1.0	1.0	1.0	.7	
2			.7	.7	.7		
1							

Пропуски в узлах сетки означают, что воздействие на стебель водного растения получается отрицательным из-за несоблюдения условия $H/\lambda_m = 0,1 \div 0,5$ и $\lambda_m/h_m = 8 \div 40$ формулы (57).

– PLANT-NV.DAT (или PLANTSR. DAT) содержит ту же информацию в виде, пригодном для построения изолиний характеристик в пакете «SURFER».

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Практическое использование моделей многогранно и может осуществляться как при решении задач сугубо теоретического характера, так и при оценке последствий антропогенного воздействия на компоненты экосистем внутренних водоемов. Рассмотрим некоторые направления применения моделей программного комплекса к глубоководной и мелководной зонам водохранилищ.

4.1. Расчет общей циркуляции вод

Применение стационарной модели ветровых течений (блок «FFF») к условиям водохранилищ позволяет: рассчитать скорость и направление течения на отдельных горизонтах, а также скорость и направление переноса воды в отдельных слоях водной толщи; рассчитать вертикальную составляющую вектора скорости течения на отдельных горизонтах, в конкретном слое и в целом от поверхности до дна; определить режимные характеристики течений; выделить зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса воды и границы круговоротов воды; рассчитать параметры течений без учета влияния какого-либо одного (или нескольких) внешних факторов — ветра, притока и рельефа дна.

Таким образом, применение данной модели позволяет:

- исследовать пространственную структуру циркуляции воды и ее изменение при фиксированных и меняющихся по пространству внешних факторах;
- выявить роль отдельных факторов в формировании циркуляции водных масс.

4.1.1. Описание структуры общей циркуляции вод. Рассмотрим особенности структуры общей циркуляции воды на примере волжских водохранилищ. Модельные расчеты проводились для их наиболее широких участков: Ивановского плеса Ивановского водохранилища, нижнего участка Угличского водохранилища, речных и Главного плесов Рыбинского водохранилища, нижнего участка Горьковского водохранилища, Волжско-Камского расширения Куйбышевского водохранилища и для средней и нижней части Волгоградского водохранилища при средне-сезонных (май—октябрь) гидрометеорологических условиях (расходах по основным притокам 50% обеспеченности, преобладающих направлениях ветра скоростью 1 и 50% обеспеченности и отметках уровня, равных НПУ). Границы моделируемых участков приведены на рисунке 4.1, а значения входных параметров при моделировании — в таблице 4.1.

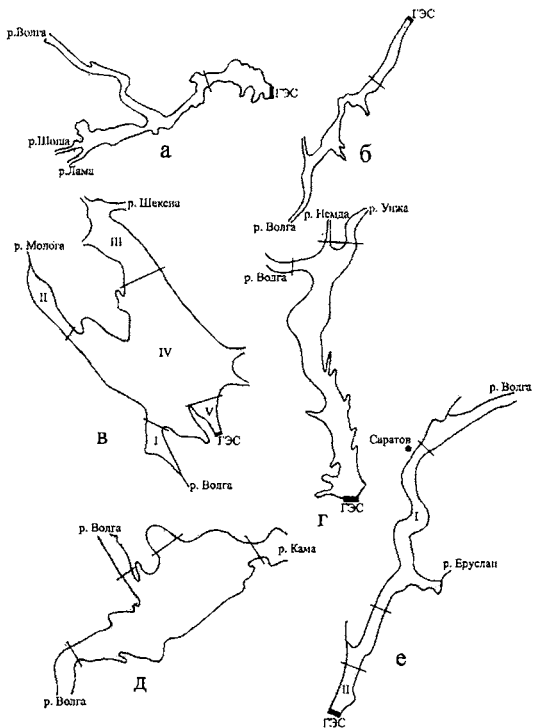


Рис. 4.1. Схемы расположения моделируемых участков в водохранилищах: а — Ивановское; б — Угличское; в — Рыбинское (I — Волжский плес; II — Моложский плес; III — Шексинский плес; IV — Главный плес; V — приплотинный участок); г — Горьковское; д — Куйбышевское; е — Волгоградское

В силу сформулированных ограничений по применению модели к Ивановскому и Угличскому водохранилищам и речным плесам Рыбинского водохранилища (глава II) расчеты циркуляции воды при ветрах, совпадающих с направлением стокового течения, не выполнялись.

Таблица 4.1

Значения входных параметров при моделировании циркуляции воды в волжских водохранилищах

Водохранилище	L, км	B, км	Q, м³/с	α_v		W, м/с		l, м	НПУ, м
				град.	П%	50%	1%		
Иваньковское	30	2	390	90	28	4	13	250	124
Угличское	35	1.6	400	45	28	4	13	250	113
Рыбинское:									
Волжский плес	30	7	400	315	60	6	15	250	102
Моложский плес	34	6	170	180	25	6	15	500	102
Шекснинский плес	30	9	210	180	25	6	15	500	102
Главный плес	90	33	400 ¹⁾	315	60	6	15	2000	102
			170 ²⁾	180	25	6	15		
			210 ³⁾	$\Sigma\alpha_w$ ⁴⁾		6	15		
приплотинный участок	22	7	1100	315	60	6	15	250	102
			2300	315	60	6	15		
Горьковское	90	10	1330	250	65	6	15	1000	84
			1330	135	30	6	15		
Куйбышевское	65	16	3000 ⁵⁾	245	63	6	15	1000	53
			4000 ⁶⁾	45	24	6	15		
Волгоградское	190	10	11500	360	47	5	15	1000	15
			11500	180	30	5	15		

Примечание: L — длина участка; B — средняя ширина участка; Q — расход воды по основным притокам: ¹⁾ — р. Волга, ²⁾ — р. Молога, ³⁾ — р. Шексна, ⁵⁾ — р. Кама, ⁶⁾ — р. Волга; α_v — направление ветра и его повторяемость (П), ⁴⁾ — суммарное воздействие ветра с учетом двух преобладающих румбов 315 и 180 град; W — скорость ветра 50 и 1% обеспеченности; l — шаг расчетной сетки; НПУ — нормальный подпорный уровень.

Анализ результатов моделирования позволил выявить следующие особенности циркуляции вод в волжских водохранилищах. В Горьковском, Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах при ветрах, совпадающих с направлением стокового течения (соответственно 315, 45 и

360 град.) на всей акватории водоемов формируется **однаправленный по вертикали и в плане перенос воды стокового характера**. Циркуляционных зон не образуется. Скорости течения на вертикалях вниз по каскаду возрастают с увеличением объема стока и составляют в верхних, средних и нижних слоях соответственно 2—13, 3—4, 2—3 см/с (Горьковское водохранилище), 4—14, 3—4, 2—3 см/с (Куйбышевское водохранилище) и 17—48, 11—27, 4—23 см/с (Волгоградское водохранилище).

При ветрах, поперечных и противоположных направлению стокового переноса воды, на всех исследуемых участках водоемов (кроме Главного плеса Рыбинского водохранилища, который будет рассмотрен отдельно) формируется **горизонтальная циркуляция**, состоящая из 3—6 циклонических и антициклонических круговоротов, расположенных соответственно над лево- и правобережной затопленной поймой, разделенных русловым стоковым потоком. Форма круговоротов эллиптическая с соотношением большой и малой оси от 2:1 до 5:1 в водохранилищах Верхней и Средней Волги и от 5:1 до 15:1 — в Волгоградском водохранилище. Горизонтальный размер круговоротов зависит от морфометрических особенностей участка водоема и изменяется по большой оси от 0.5 до 30 км (рис. 4.2). Суммарная площадь круговоротов в Ивановском, Угличском водохранилищах и речных плесах Рыбинского водохранилища мало изменяется и в среднем составляет ~ 14 км² (8% от площади моделируемых участков водохранилищ). В Горьковском водохранилище суммарная площадь круговоротов увеличивается до 200 км², а в Куйбышевском и Волгоградском — до 430 км² (25—35% от площади исследуемых участков водоемов) (табл. 4.2).

Скорости течения на вертикалях в верхних, средних и придонных слоях соответственно изменяются в пределах 3—8 см/с (Ивановское, Угличское водохранилища), 4—12, 3—6, 2—8 см/с (речные плесы Рыбинского водохранилища), 4—12, 3—10 см/с (Горьковское и Куйбышевское водохранилища) и 20—37, 16—26, 8—30 см/с (Волгоградское водохранилище). Периферия круговоротов соответствуют повышенные, а центрам вихрей — пониженные скорости переноса воды.

С усилением скорости ветра до штормовых значений качественных изменений в структуре циркуляции вод не происходит. Отмечается только некоторая интенсификация вихрей, увеличение их протяженности по продольной оси и суммарной площади круговоротов. Скорости течения на отдельных горизонтах увеличиваются в 1,5—2 раза.

В Главном плесе Рыбинского водохранилища формирующаяся общая циркуляция вод также представляет собой **систему циклонических и антициклонических круговоротов**, но в гораздо большем диапазоне масштабов: от мезомасштабных — 5—10 км, до крупномасштабных — 10—90 км. Площадь таких вихревых образований достигает 2000 км² (или 65% площади акватории Главного плеса) (табл. 4.2). Круговороты имеют эллиптическую форму с соотношением большой и малой оси от 2:1 до 5:1 (рис. 4.3).

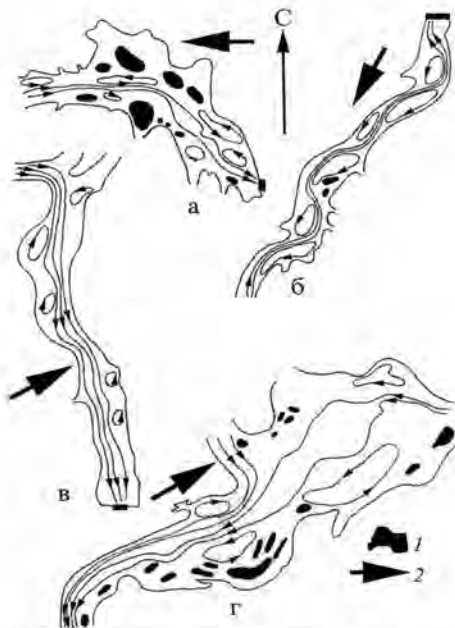


Рис. 4.2. Схемы интегральной циркуляции воды в безледный период в водохранилищах:

а — Ивановском; б — Угличском; в — Горьковском; г — Кузбывшевском;
1 — острова; 2 — направление ветра

Скорости течения в верхних слоях изменяются от 3 до 12, в средних и нижних — от 1 до 4 см/с. При усилении скорости ветра до штормовых значений (15 м/с) структура циркуляции воды качественно не изменяется. Величина суммарной площади круговоротов остается аналогичной выше указанной. Вместе с тем, скорости течения по вертикали увеличиваются в 1,5—2 раза.

Сравнительно небольшие горизонтальные скорости течения в средних и придонных слоях Главного плеса водохранилища, рассчитанные для преобладающих в безледный период гидрометеорологических условий, позволяют предположить **возрастание роли вертикальной компоненты вектора скорости течения в перемешивании толщи воды**. Оценочные расчеты вертикальной компоненты по формулам (27) показали, что ее величина составляет 10^{-3} — 10^{-4} см/с, а наиболее вероятное влияние на перемешивание может происходить на глубинах >10 м, где вертикальная составляющая скорости орбитального движения частиц воды в волнах уменьшается до аналогичных величин (10^{-3} — 10^{-4} см/с) [54]. Поскольку

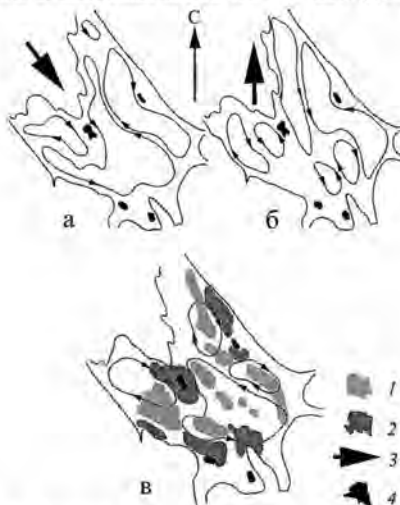


Рис. 4.3. Схемы интегральной циркуляции воды в безледный период в Рыбинском водохранилище:

а — при северо-западном ветре 6 м/с; **б** — при южном ветре 6 м/с; **в** — при суммарном ветровом воздействии с учетом двух румбов 315 и 180 град.; **1, 2** — соответственно зоны максимальных и минимальных скоростей интегрального переноса; **3** — направление ветра; **4** — острова

глубоководные районы Главного плеса водохранилища — районы интенсивного илонакопления, вертикальная компонента течения может играть достаточно ощутимую роль в перемещении взвесей в пределах водной толщи и оказывать непосредственное влияние на условия формирования продуктивных местообитаний гидробионтов.

Таблица 4.2

**Пространственные характеристики вихревых образований
в водохранилищах волжского каскада при преобладающих
в безледный период гидрометеорологических условиях**

Водохранилище	<i>n</i>	<i>L</i> , км	<i>B</i> , км	<i>L/B</i>	ΣS , км ²	<i>S</i> , %
Иваньковское	6	0,7—5	0,3—1	2—5	12	18
Угличское	6	2,5—5	0,5—1,2	2—5	12	7
Рыбинское:						
Волжский плес	4	1—10	0,8—1,8	2—8	12	5
Моложский плес	4	2—9	1,2—2,5	2—8	12	5
Шекснинский плес	3	2—12	1—6	2—5	20	10
Главный плес	4—6	5—90	2—20	2—5	2000	65
Горьковское	5	4—12	1,5—2,5	2—5	200	25
Куйбышевское	4	6—16	3—4	2—5	430	35
Волгоградское	6	7—30	2—3	5—15	430	25

Примечание: *n* — число круговоротов; *L* — длина круговоротов по большей оси; *B* — ширина круговоротов; ΣS — суммарная площадь круговоротов; *S* — процент площади круговоротов от площади моделируемого участка водохранилища.

Другими важными структурными элементами общей циркуляции в волжских водохранилищах являются зоны схождения и расхождения потоков воды (соответственно наибольших и наименьших скоростей интегрального переноса). Зоны схождения потоков расположены между вихревыми образованиями и на их периферии, а зоны расхождения потоков, кроме периферийных областей, отмечаются и в центральных частях круговоротов. Зоны, как правило, ориентированы в направлении интегрального переноса, их средний горизонтальный размер варьирует от 0,5 до 7—12 км, а суммарная площадь составляет 18—20% от общей площади круговоротов.

Таким образом, исходя из пространственных характеристик структурных элементов общей циркуляции воды, на начальном этапе рассматриваемые водоемы условно можно разделить на две группы. К первой относятся все водохранилища и их участки (кроме Главного плеса Рыбинского водохранилища), где преобладающее влияние на формирование циркуляции оказывает приток в водоемы (суммарная площадь кру-

говоротов занимает < 50% площади исследуемых участков). Ко второй группе относится озеровидный Главный плес Рыбинского водохранилища, где развивается преобладающая ветровая циркуляция вод (площадь круговоротов занимает > 50% площади плеса). Для более точной ранжировки волжских водохранилищ по условиям формирования их структуры течений необходимо провести количественную оценку вклада внешних факторов, обуславливающих тот или иной характер циркуляции водных масс.

4.1.2. Оценка роли факторов в формировании общей циркуляции вод. Как уже отмечалось выше, горизонтальная циркуляция вод, различная в каждом конкретном водоеме, формируется в результате совместного воздействия трех основных факторов: ветрового напряжения на водную поверхность, притока в водоем и стока из него, рельефа дна. В озеровидных плесах водохранилищ циркуляция воды определяется в основном этими тремя факторами. Для периода интенсивного весеннего прогрева при установлении вертикального расслоения водной толщи кратковременно проявляется эффект бароклинности [21]. В речных плесах водохранилищ, кроме этих трех факторов, существенную роль в формировании циркуляции играет морфометрия участка.

Для оценки вклада внешних факторов, обуславливающих общую циркуляцию воды в водохранилищах, может быть предложен метод, основанный на серии расчетов течений с последовательным исключением воздействия ветра, притока и рельефа дна. Вклад каждого фактора рассчитывается с учетом его влияния на образование и площадные характеристики круговоротов воды по следующим формулам:

$$\delta_c = \left| \frac{S_{s+c+p} - S_{s+p}}{S_{s+c+p}} \right|, \quad \delta_p = \left| \frac{S_{s+c+p} - S_{s+c}}{S_{s+c+p}} \right|, \quad \delta_s = \left| \frac{S_{s+c+p} - S_{c+p}}{S_{s+c+p}} \right|,$$

$$\Delta_c = \frac{100\delta_c}{\delta_c + \delta_p + \delta_s}, \quad \Delta_p = \frac{100\delta_p}{\delta_c + \delta_p + \delta_s}, \quad \Delta_s = \frac{100\delta_s}{\delta_c + \delta_p + \delta_s},$$

где $\delta_c, \delta_p, \delta_s$ — относительное влияние на изменение площади круговоротов соответственно стока, рельефа дна и ветра; S_{s+c+p} — площадь круговоротов при совместном действии ветра, стока и рельефа дна; S_{s+p} — то же при совместном действии ветра и рельефа дна и отсутствии стока; S_{s+c} — то же при совместном действии ветра и стока и плоском рельефе дна; S_{c+p} — то же при совместном действии стока и рельефа дна и отсутствии ветра; $\Delta_c, \Delta_p, \Delta_s$ — вклад соответственно стока, рельефа дна и ветрового воздействия в %.

В вариантах расчета, не учитывающих рельеф дна, задавались одинаковые значения глубины, равные средней глубине участка.

Оценка вклада внешних факторов в формирование циркуляции воды осуществлялась для указанных выше (табл. 4.3) средних в безледный период гидрометеорологических условий. Из-за выявленных ограничений по применению модели к речным плесам Рыбинского водохранилища оценка вклада внешних факторов для них не проводилась. Принимая также во внимание ограничения по применению модели и к Иваньковскому, и Угличскому водохранилищам, при оценке роли факторов в формировании циркуляции их вод нами использовались данные натурных наблюдений над течениями.

Таблица 4.3

**Вклад основных факторов в формирование циркуляции вод
в волжских водохранилищах при преобладающих
в безледный период гидрометеорологических условиях**

Водохранилище	Факторы						$H_{ср},$ м	$f_0,$ км ²	K_r	$K_{от}$
	сток		рельеф		ветер					
	50%	1%	50%	1%	50%	1%				
Угличское	100	100	—	—	—	—	5	66	22	13
Иваньковское	100	100	—	—	—	—	4	160	15	40
Волгоградское	100	100	—	—	—	—	10	1830	19	182
Горьковское	55	30	13	20	32	50	5,5	640	9	116
Куйбышевское	10	10	40	30	50	60	6	970	4	162
Рыбинское (Глав- ный плес)	10	8	20	16	70	76	5,6	3077	3	549

Примечание: 50 и 1% — обеспеченность скорости ветра (значения даны в табл. 4.1), остальные обозначения указаны в тексте ниже.

В результате анализа структуры течений по натурным данным было выявлено, что в Иваньковском и Угличском водохранилищах при преобладающих ветрах западной четверти (повторяемость > 60%), совпадающих с направлением стокового течения, и расходах по р. Волге как близких к 50% обеспеченности, так и превышающих их, циркуляция воды, формирующаяся за счет совместного действия стока и ветра, носит характер стокового течения (без образования круговоротов) и поэтому может быть отнесена к **стоковой**. Такой же тип циркуляции отмечается и в Волгоградском водохранилище, где при преобладающих ветрах северной четверти (повторяемость 47%) круговоротных зон не образуется.

В Горьковском водохранилище формируется **стоково-ветровая** циркуляция воды при вкладе стока — 55%, ветра — 32%, рельефа дна — 13%. К другой группе водоемов относится Куйбышевское и Рыбинское водохранилища, где формируется **ветровая** циркуляция воды с вкладом ветра — 50—70%, рельефа дна — 20—40% и стока 10%. В случае штормовых вет-

ров в последних двух водоемах вклад стока в формирование циркуляции остается неизменным (8—10%), а вклад ветра несколько увеличивается за счет снижения вклада рельефа дна. Горьковское водохранилище из группы водоемов с преобладающей стоково-ветровой циркуляцией переходит в группу водоемов с характерной ветровой циркуляцией воды (табл. 4.3).

Выявленные закономерности условий формирования общей циркуляции вод в волжских водохранилищах хорошо согласуются с морфометрическими показателями водоемов: коэффициентами удлиненности $K_y = L/B$ и открытости $K_{от} = f_0/H_{cp}$ (f_0 — площадь водного зеркала, H_{cp} — средняя глубина). Так, по мере уменьшения K_y и соответственно увеличения $K_{от}$ вклад стока в формирование циркуляции воды постепенно уменьшается, а роль ветра — возрастает, что подразумевает переход от водохранилищ речного типа к водохранилищам озеровидным. Исключение составляет Волгоградское водохранилище, где воздействие стока блокирует ветровое воздействие несмотря на достаточно большой коэффициент открытости водоема. В целом с увеличением вклада стока происходит подавление формирования круговоротов, что проявляется в уменьшении их суммарной площади, а увеличение роли ветра приводит к возрастанию суммарной площади циркуляционных образований.

Таким образом, выявленные особенности структуры горизонтальной циркуляции воды как в речных, так и в озеровидных плесах водохранилищ открывают возможность глубокого анализа роли динамики вод в распределении и перемещении отдельных видов гидробионтов и формировании зон аккумуляции биомассы в водоемах разного типа.

4.2. Расчет траекторий перемещения объемов воды и скоплений гидробионтов

Использование блока «LAGRANGE» позволяет строить траектории перемещения единичных объемов воды — индикаторов структуры горизонтальной циркуляции воды, а также выявить ее возможные изменения в результате изменений основных формирующих факторов: поля ветра, рельефа дна, притока в водоем. Построение траекторий перемещения скоплений гидробионтов создает основу для составления схем их распределения (аккумуляции или рассеивания) и определения механизмов формирования продуктивных местообитаний в глубоководной зоне.

4.2.1. Расчет перемещения единичных объемов воды. Построение траекторий перемещения единичных объемов воды при различных гидрометеорологических условиях создает основу для выделения структурных элементов горизонтальной циркуляции воды: разномасштабных циклонических и антициклонических круговоротов, зон транзитного

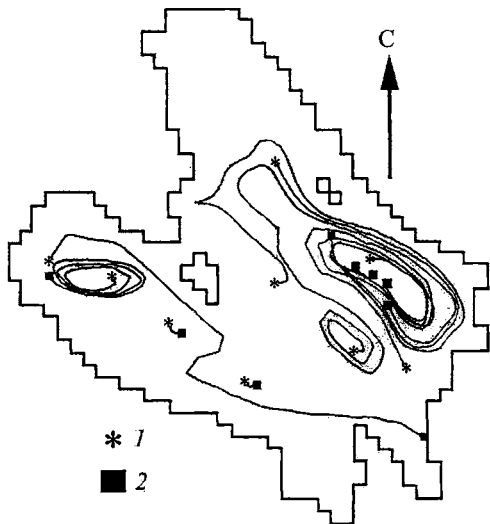


Рис. 4.4. Схема траекторий перемещения единичных объемов воды в Главном плесе Рыбинского водохранилища (соответствует схеме циркуляции воды на рис. 4.3 в):

1, 2 — соответственно начальное и конечное положение объемов

переноса водных масс. Выявлено, что в циклонических круговоротах наблюдается постепенный выход по спирали объемов воды, а в антициклонических — сгущение траекторий и задержка последних (рис. 4.4).

Изменение характера циркуляции вод при усилении (ослаблении) роли отдельных факторов, в частности притока в водоем или поля ветра, было показано ранее (п. 4.1.2). Искусственное изменение рельефа дна (выработка карьеров в процессе добычи песчано-гравийных смесей, дноуглубление в судоходных целях и т. д.) также может привести к качественным и количественным локальным изменениям горизонтальной циркуляции воды. Так, в результате выработки трех карьеров общей площадью ~ 2,5 км² в приплотинном участке Рыбинского водохранилища

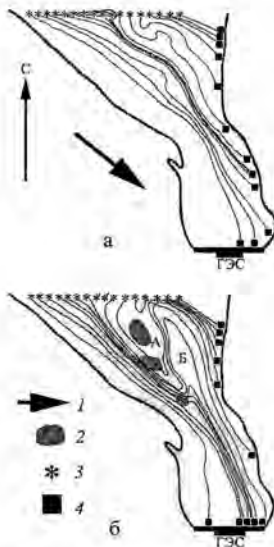


Рис. 4.5. Схемы траекторий перемещения единичных объемов воды в приплотинном участке Рыбинского водохранилища при северо-западном ветре:

а — при естественном рельефе дна; б — с учетом выработанных карьеров; 1 — направление ветра, 2 — положение карьеров, 3, 4 — соответственно начальное и конечное положение объемов

(участок V на рис. 4.1 а) возможно формирование, по сравнению с условиями ненарушенного рельефа дна, двух круговоротов воды (А и Б на рис. 4.5 б). Наличие здесь циркуляционных образований с минимальными скоростями интегрального переноса воды создаст благоприятные гидродинамические условия для увеличения плотности рыб, задержки молоди в пределах карьеров и снижения ее попадания в агрегаты Рыбинской ГЭС.

Другой важной особенностью использования лагранжевых построений является возможность прогнозирования по траекториям перемещения объемов воды, их поступление в процентном соотношении к водозаборным сооружениям разнообразных энергетических объектов. На примере Конаковской ГРЭС (Иваньковское водохранилище) было показано, что при наличии двух действующих береговых насосных станций (БНС) наибольший суммарный процент поступления воды в водозаборы отмечается при ветрах западной четверти. Причем к БНС2, расположенной ниже по течению, поступает в 1,5 раза больше воды, чем к БНС1. Ввод же в эксплуатацию предполагаемого третьего водозабора, который будет располагаться в 100 м ниже по течению от БНС2, может в 2 раза повысить риск попадания в зону его влияния за счет засасывающего эффекта скопления рыб из прилегающей русловой и правобережной мелководной зоны водохранилища (рис. 4.6) [63].

Возможность одновременного расчета пространственного изменения координат ряда точек, ограничивающих некую область, позволяет выявить особенности ее перемещения во времени. Поскольку в базовой

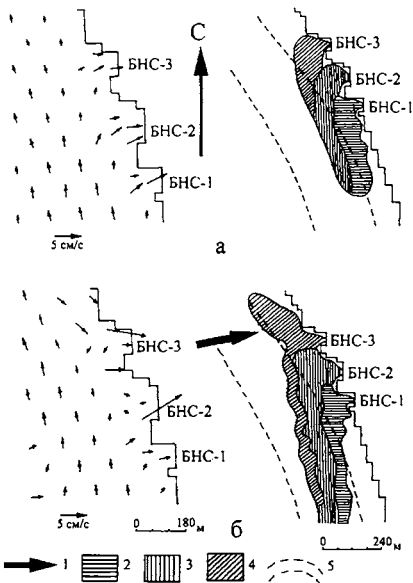


Рис. 4.6. Горизонтальная циркуляция воды и схемы перемещения единичных объемов воды (скопления рыб) в районе водозаборов Конаковской ГРЭС:

а — в штилевых условиях; *б* — при ветре 260° 4 м/с; 1 — направление ветра; 2—4 — перемещение объемов воды соответственно к БНС1, БНС2 и БНС3; 5 — русло р. Волги

гидродинамической модели пренебрегается горизонтальной турбулентной диффузией, адекватный расчет перемещения пятна следует производить на небольшой промежуток времени, а также выбирать пятна микро- и мезомасштаба. В этом случае деформация формы пятна при перемещении будет обуславливаться только структурой поля течений в конкретном районе водоема (рис. 4.7).

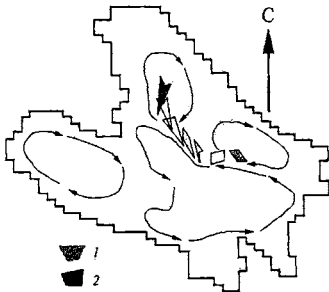


Рис. 4.7. Схема интегральной циркуляции воды и перемещения пятна в Главном плесе Рыбинского водохранилища при суммарном ветровом воздействии с учетом двух румбов 315 и 180 град.

1, 2 — соответственно начальное и конечное положение пятна

4.2.2. Выделение зон аккумуляции биомассы. Методологию выделения зон аккумуляции биомассы во внутренних водоемах можно проиллюстрировать на примере Рыбинского водохранилища. В основе такой методологии лежит построение траекторий перемещения скоплений гидробионтов, выявление районов их плотных и разреженных скоплений.

Траектории перемещения скоплений фито- и зоопланктона (пелагических рыб) вычислялись соответственно по формулам (9, 29) и (11, 12). В последнем случае учитывались СВМ организмов. В качестве гидродинамических условий использовалась преобладающая в летний период (июнь—август) горизонтальная циркуляция воды (рис. 4.8 а). Исходными распределениями гидробионтов служили среднелетние значения распределения концентрации хлорофилла «а» [42], биомассы зоопланктона [67, 68], плотности пелагических рыб [49, 53]. Вычисления выполнялись с шагом по времени 24 ч.

В результате расчетов было установлено, что точки, идентифицируемые как фитопланктон и находящиеся в центрах антициклонических круговоротов, в течение всего рассматриваемого периода не выходили за их пределы. Практически все биоскопления (~ 87%) в циклоническом круговороте переместились в области антициклонов или остались вблизи зон расхождения потоков воды. Идентифицируемый зоопланктон и рыбы в целом перемещались аналогично скоплениям фитопланктона. В ряде случаев за счет СВМ их траектории были существенно короче. В целом же оказалось, что преобладающее большинство точек не вышло

за пределы суммарной акватории распространения скоплений планктона и рыб (рис. 4.8 б). Устойчивые зоны наибольшей встречаемости скоплений гидробионтов или совпадали, или были близки по расположению к выделенным ранее районам активного илонакопления (продуктивным биотопам) (рис. 4.8 в). Образование и в целом для сезона повышенная встречаемость в этих районах плотных скоплений планктона отмечались предшествующими исследованиями и обосновывались взаимодействием двух групп факторов: лучшими условиями питания и размножения растений и животных в зонах активной седиментации и минерализации водных взвесей и спецификой переноса групп особей из скоплений под действием течений [51, 62].

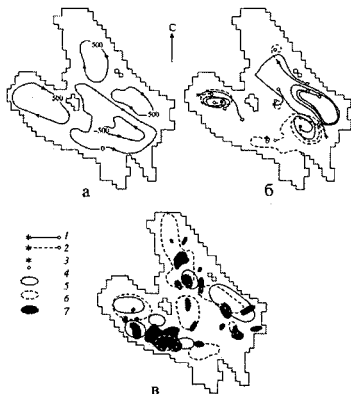


Рис. 4.8. Схемы преобладающей летом интегральной циркуляции воды (изолинии функции полных потоков, m^3/c) (а), траектории перемещения точек (скоплений гидробионтов) (б), положения рассчитанных по модели зон наибольшей встречаемости гидробионтов и продуктивных биотопов [51] (в):

1—б — соответственно траектории перемещения скоплений фито- и зоопланктона (рыб), начальные и конечные точки траекторий перемещения скоплений, зоны наибольшей встречаемости фито- и зоопланктона (рыб); 7 — продуктивные биотопы

Таким образом, полученные с помощью модельных расчетов районы наибольшей встречаемости скоплений планктона и рыб можно рассматривать в качестве зон аккумуляции биомассы: в пелагиали — планктонных организмов, как кормовой базы пелагических рыб, в батиали — бентоса, как кормовой базы бентосоядных рыб. Применение описанной выше модели перемещения гидробионтов для озер и водохранилищ может дать полезную информацию об особенностях переноса скоплений планктона и рыб под действием течений при различных гидрометеорологических условиях и разных по продолжительности промежутках времени, выявлять районы наибольшей встречаемости скоплений и тем самым прогнозировать в водоеме положение устойчивых зон аккумуляции биомассы.

4.3. Расчет распространения взвешенных веществ и сточных вод

В результате полевых и экспериментальных исследований установлено, что наибольшее отрицательное влияние строительных работ на внутренних водоемах проявляется в формировании шлейфов повышенной концентрации взвешенных веществ. Возникающий в процессе выработки грунта шлейф воды повышенной мутности вызывает разрушение клеток фитопланктона, их коагуляцию со взвесями и осаждение. Частицы взвеси повреждают зоопланктонные организмы с большой поверхностью тела и слабым коловращательным аппаратом, шиповатые формы ротаторного и рачкового зоопланктона. У рачков-фильтраторов засоряется также фильтрационный аппарат. В результате механического воздействия полностью уничтожаются бентосные организмы.

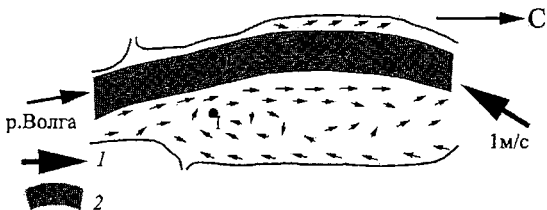


Рис. 4.9. Схема горизонтальной циркуляции воды в речной части Волжского плеса Рыбинского водохранилища (римские цифры — номера и положение источников взвешенных частиц):

1 — направление ветра, 2 — русло р. Волги

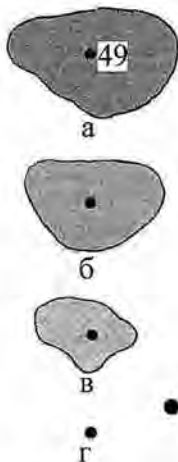


Рис. 4.10. Изменение границ шлейфа вод повышенной мутности во времени от источника, расположенного на затопленной пойме (точка I на рис. 4.9) речного участка Волжского плеса Рыбинского водохранилища:

а — положение установившегося пятна через 8100 с (~ 2,25 ч) после начала работы источника; б — положение пятна через 1900 с (~ 0,53 ч) после отключения источника (общее время 10000 с); в — положение пятна через 2900 с (~ 0,8 ч) после отключения источника (общее время 11000 с); г — рассевание пятна через 4500 с (~ 1,25 ч) после отключения источника (общее время 12600 с); I — положение источника (49 мг/л — начальная концентрация взвесей в источнике)

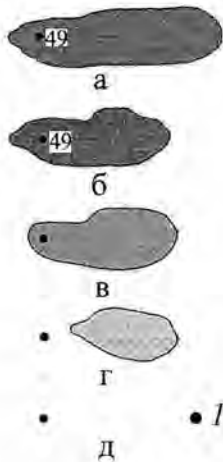


Рис. 4.11. Изменение границ шлейфа вод повышенной мутности во времени от источника, расположенного на русле (точка II на рис. 4.9) речного участка Волжского плеса Рыбинского водохранилища:

а — положение установившегося пятна через 27900 с (~ 7,75 ч) после начала работы источника; б — положение пятна через 10000 с (~ 2,78 ч) работы источника; в — положение пятна через 5000 с (~ 1,39 ч) после отключения источника (общее время 15000 с); г — положение пятна через 11000 с (~ 3,02 ч) после отключения источника (общее время 21000 с); д — рассевание пятна через 17000 с (~ 4,76 ч) после отключения источника (общее время 27000 с); I — положение источника (49 мг/л — начальная концентрация взвесей в источнике)

Кроме того, при осаждении взвешенных веществ происходит захоронение бентосных биоценозов. Особенно губительна повышенная мутность воды для моллюсков-фильтраторов. Лишь для олигохет шлейф мутности не является детальным фактором. Все это приводит к качественным изменениям и количественному уменьшению кормовой базы рыб. Установлено, что пороговое содержание взвесей, свыше которого могут происходить необратимые изменения в жизнедеятельности и гибель гидробионтов, составляет 20 мг/л [17, 50].

Ограничение протяженности шлейфов вод с повышенной концентрацией взвешенных веществ в соответствии с природоохранными требованиями может быть осуществлено применением менее мощной добывающей техники.

Таким образом, шлейфы вод с повышенной концентрацией взвешенных веществ оказывают локальные по пространству и достаточно продолжительные во времени воздействия на распределение кормовой базы и рыб на участке водоема, где ведутся дноуглубительные работы. Расчет распространения таких шлейфов с помощью рассмотренных в блоке «TURBIDITY» моделей позволяет выявить как общую зону распространения мутных вод, так и зону патологических изменений и гибели гидробионтов при концентрациях взвесей ≥ 20 мг/л.

В качестве примеров использования моделей этого блока для оценки воздействия мутных вод на экосистему водоема приведем ряд иллюстраций (рис. 4.9—4.14), где смоделированы некоторые сценарии работы добывающих механизмов.

Сценарий 1. Рассматривается речной участок Волжского плеса Рыбинского водохранилища. Приток по р. Волге равен $400 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер северо-восточный при скорости 1 м/с. Выбраны два положения земснаряда: на правобережной затопленной пойме (I) и на русле (II). Производительность добывающей техники $200 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация взвешенных частиц в источнике $49 \text{ г}/\text{м}^3$, фоновая концентрация $6 \text{ г}/\text{м}^3$. За минимальный контролирующий диаметр взвешенных частиц, определяющий границы поля мутности, принимается диаметр 2% обеспеченности (в соответствии с рекомендациями для водоемов, имеющих особо важное рыбохозяйственное значение) — $0,04 \text{ мм}$ при гидравлической крупности $u_n = 0,001175 \text{ м/с}$. Предельно допустимое отклонение концентрации взвесей от фоновых значений — $0,25 \text{ г}/\text{м}^3$ [12, 46].

Согласно результатам расчетов, структура горизонтальной циркуляции воды характеризуется русловым стоковым потоком и ветровым компенсационным течением, распространяющимся над затопленной поймой. В зоне взаимодействия стокового и ветрового потоков формируются круговороты воды антициклонического знака (рис. 4.9.).

Процесс моделирования на пойме (точка I) включает: расчет с шагом по времени 50 с поля концентраций взвешенных частиц до выхода задачи на стационарный режим (рис. 4.10 а), последующее отключение источника и расчет концентраций до полного исчезновения пятна (рис. 4.10 б—г).

Выявлено, что с момента начала расчетов шлейф воды повышенной мутности существовал 12600 с ($\sim 3,5$ ч).

В русловой зоне (точка II) расчеты включали: вычисление распространения шлейфа до выхода задачи на стационарный режим (рис. 4.11 а), вычисление распространения шлейфа за 10000 с ($\sim 2,78$ ч) (рис. 4.11 б), отключение источника и расчет концентраций до полного рассеивания пятна (рис. 4.11 в—д). В данном случае время существования пятна вод повышенной мутности составило 27000 с ($\sim 7,5$ ч).

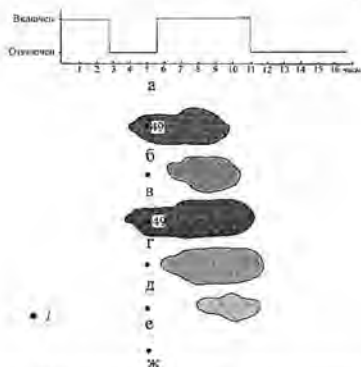


Рис. 4.12. Нестационарный режим работы источника, расположенного на русле (точка II на рис. 4.9) речного участка Волжского плеса Рыбинского водохранилища (а) и изменение границ шлейфа вод повышенной мутности во времени:

б — через 10000 с ($\sim 2,8$ ч) после начала работы источника; в — через 10000 с ($\sim 2,8$ ч) после отключения источника (общее время 20000 с); г — через 20000 с ($\sim 5,5$ ч) после повторного включения источника (общее время 40000 с); д — через 10000 с ($\sim 2,8$ ч) после повторного отключения источника (общее время 50000 с); е — через 15000 с ($\sim 4,2$ ч) после повторного отключения источника (общее время 55000 с); ж — рассеивание пятна через 20000 с ($\sim 5,5$ ч) после повторного отключения источника (общее время 60000 с); I — положение источника (49 мг/л — начальная концентрация взвесей в источнике)

Сценарий 2. Начальные условия задаются такие же, как и в предыдущем сценарии. Назначается нестационарный режим работы источника взвешенных частиц: работа 10000 с (~2,8 ч), отключение на 10000 с (~2,8 ч), включение и работа 20000 с (~5,5 ч), выключение. С момента последнего отключения источника до полного рассеивания пятна прошло 20000 с (~5,6 ч). Общее время воздействия шлейфа воды повышенной мутности на окружающую среду составило 60000 с (~16,7 ч) (рис. 4.12).

Сценарий 3. Рассматривается нижний участок Угличского водохранилища. Расход по р. Волге равен $400 \text{ м}^3/\text{с}$. Действует северо-восточный ветер со скоростью 3 м/с . На восточной кромке вырабатываемого карьера работают одновременно два земснаряда производительностью $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ каждый. Концентрация взвесей в источнике составляет 215 г/м^3 , фоновая концентрация — $4,4 \text{ г/м}^3$. Остальные входные параметры такие же, как и в сценарии 1.

В соответствии с расчетами, структура горизонтальной циркуляции воды характеризуется русловым стоковым потоком и ветровыми компенсационными течениями, распространяющимися над право- и левобережной затопленной поймой. В зоне взаимодействия стокового и ветрового

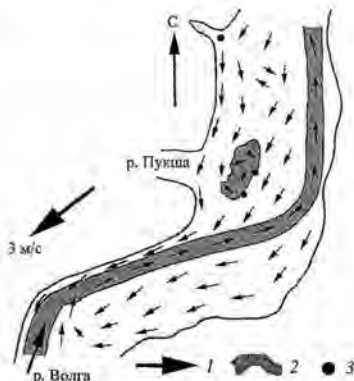


Рис. 4.13. Схема горизонтальной циркуляции воды в нижней части Угличского водохранилища:

1 — направление ветра; 2 — русло р. Волги; 3 — положение земснарядов

потоков, а также в районе карьера формируются круговороты воды антициклонического знака (рис. 4.13). Суммарный шлейф вод повышенной мутности воды от работы двух земснарядов достигает окончательных размеров спустя 15500 с (~ 4,3 ч) с момента начала работы механизмов (рис. 4.14).

Таким образом, достаточная гибкость применения блока «TURBIDITY» позволяет учитывать и принимать во внимание различные сочетания режимов работы добывающих устройств и, тем самым, адекватно прогнозировать пространственные характеристики шлейфов вод повышенной концентрации взвесей, используемых в дальнейшем при оценке воздействия строительных работ на экосистему водоема и разработке компенсационных природоохранных мероприятий.

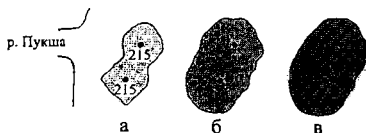


Рис. 4.14. Распространение шлейфа вод повышенной мутности во времени от источников, расположенных на кромке карьера (рис. 4.13) в нижней части Угличского водохранилища:

а — положение пятна через 1000 с (~ 0,28 ч) работы источников; б — положение пятна через 7700 с (~ 2,14 ч) работы источников; в — положение установившегося пятна через 15500 с (~ 4,3 ч) работы источников

Как уже отмечалось, программа «POLLUTION» блока «TURBIDITY» позволяет отслеживать распространение в водоеме сточных вод различного происхождения. Основываясь на имеющейся немногочисленной информации [14—16], оценим возможность прогнозирования распространения в Шекснинском плесе Рыбинского водохранилища загрязняющих веществ, поступающих от комбинатов г. Череповца. В качестве показателя загрязненности возьмем минерализацию воды (в мг/л).

Исследуемый участок акватории плеса в районе г. Череповца в гидродинамическом отношении достаточно сложен. Здесь взаимодействуют встречные стоковые течения рек Суды и Шексны, на которые накладывается ветровой перенос воды. Интенсивность стоковых течений различна и зависит от величины расходов рек, отличающихся в отдельные периоды года друг от друга в несколько раз. Рассмотрим три гидрометеорологические ситуации, относящиеся к маю, августу 1983 г. и июню 1982 г.

12—13 мая 1983 г. Сток по р. Суды и Шексны составил соответственно 200 и 115 м³/с. Преобладал юго-восточный ветер со скоростью 3,8 м/с. Минерализация воды в устье р. Кошты (в 1 км ниже по течению от сбросов Череповецкого химзавода) достигала 774 мг/л, в устье р. Ягорбы — 114 мг/л, в устье р. Суды — 114 мг/л и в р. Шексне, выше по течению от устья р. Ягорбы, — 114 мг/л. За фоновую принималась минерализация в р. Шексне (114 мг/л).



Рис. 4.15. Схемы горизонтальной циркуляции воды (а) и распространения стоков Череповецкого химзавода (б) в мае 1983 г. в Шексинском плесе Рыбинского водохранилища:

1 — направление ветра; 2 — острова; 3—6 — минерализация воды соответственно: фон — 150, 150—200, 200—300, >300 мг/л

Структура горизонтальной циркуляции формировалась стоковыми течениями рек. Явно выраженных круговоротных зон ветрового происхождения не наблюдалось (рис. 4.15 а). Распространение сточных вод из устья р. Кошты происходило в соответствии с характером течений. Огибая о. Ваганиха, шлейф минерализованной воды вышел за пределы расчетной сетки и, вероятно, смешался далее к югу в нижнюю часть плеса (рис. 4.15 б). Сопоставление рассчитанных и измеренных значений минерализации в контрольных точках отбора проб против устья р. Кошты показало их удовлетворительное соответствие: расхождение в величинах достигало 10%.

24—25 июня 1982 г., 16—19 августа 1983 г. Сток по р. Шексне был в 3—5 раз меньше, чем по р. Суде (50—75 м³/с). В июне преобладал уме-

ренный северо-восточный ветер, а в августе — западный со скоростью 7 м/с. Согласно результатам моделирования, основной вклад в формирование горизонтальной циркуляции воды вносил ветер. Стоковое течение р. Шексны практически полностью блокировалось серией круговоротов воды. Несмотря на то, что распространение сточных вод происходило в соответствии со структурой интегрального переноса, вся акватория плеса от устьев р. Суды и Кошты до о. Ваганиха и южнее него при расчете получались нереально большие величины минерализации. В реперных точках отбора проб рассчитанные и измеренные значения минерализации различались в 1,7—2 раза. Кроме того, происходило резкое увеличение минерализации воды вблизи твердых границ моделируемого участка.

Неудовлетворительные результаты моделирования могли обуславливаться несоответствием рассчитанной и реально существующей картины течений при указанных выше гидрометеорологических условиях, т. е. использование модели течений в силу выявленных ранее ограничений (см. главу II) в данных конкретных случаях было неправомерным.

Следовательно, при прогнозировании той или иной картины распространения сточных вод, равно как и любой другой характеристики качества воды, пользователям необходимо убедиться в адекватности описания структуры течений используемой моделью (блок «FFF»), учитывая ограничения по ее применению.

4.4. Выделение зон преобладающего влияния гидродинамических процессов на дно мелководий

Выделение зон преобладающего влияния на дно мелководий ветровых волн, ветровых и стоковых течений (блоки «WAVE» и «BOTTAN») представляет собой достаточно важную задачу как с точки зрения углубления теоретических представлений об особенностях проявления прибрежных динамических процессов, так и с практической стороны — при оценке интенсивности эрозии дна и берегов, вдольберегового транспорта наносов, заиления и т. д. В последнем случае для суждения о направлении и интенсивности переноса наносов могут быть использованы схемы распределения суммарной энергии волн и энергетической равнодействующей волнового режима [70], совмещенные со схемой распределения донных отложений [24].

Так, детальное районирование мелководной зоны Волжского плеса Рыбинского водохранилища по суммарной волновой энергии методом кластерного анализа позволило выделить области с минимальными, средними и максимальными волновыми нагрузками ветровых волн на дно мелководий. Наибольшее воздействие волн с энергией > 3 МДж/м отмечается вблизи нижней границы открытых мелководий в северной части плеса. Минимальные значения суммарной энергии волн (< 1 МДж/м) приурочены к заостренным пространствам и приустьевой зоне обширного мелководья,

расположенного в северо-западной части плеса. В южной части рассматриваемого участка Волжского плеса выделяются области со средними (1—3 МДж/м) и минимальными волновыми нагрузками (рис. 4.16).

Наибольшие значения равнодействующей волнового режима, направленной перпендикулярно к береговой черте, отмечены вдоль восточного

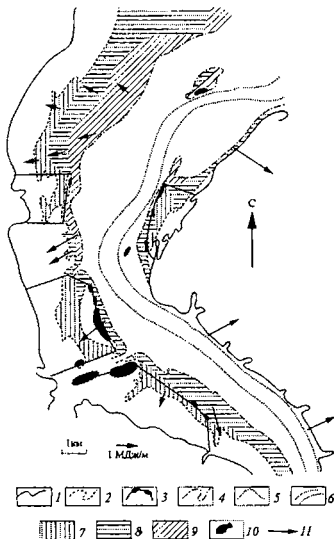


Рис. 4.16. Расположение типовых местообитаний рыб в Волжском плесе Рыбинского водохранилища:

1—6 — границы береговой линии при НПУ = 101,81 м абс., массового распространения воздушно-водной растительности при уровнях 100,7—100,5 м абс., защищенных мелководий, границы мелководной зоны, нижняя граница зоны трансседиментации, затопленное русло р. Волги; 7—9 — суммарные энергии волн ≤ 1 , 1—3, > 3 МДж/м соответственно; 10 — острова; 11 — равнодействующая волнового режима

берега, где последний носит абразионный характер. Вдоль южного и юго-западного берега величина равнодействующей меньше и направлена она под некоторым углом к береговой черте. Здесь за счет вдольбереговых волновых потоков эрозия дна преобладает над аккумуляционными процессами. В северо-западной части плеса в пределах обширной мелковод-

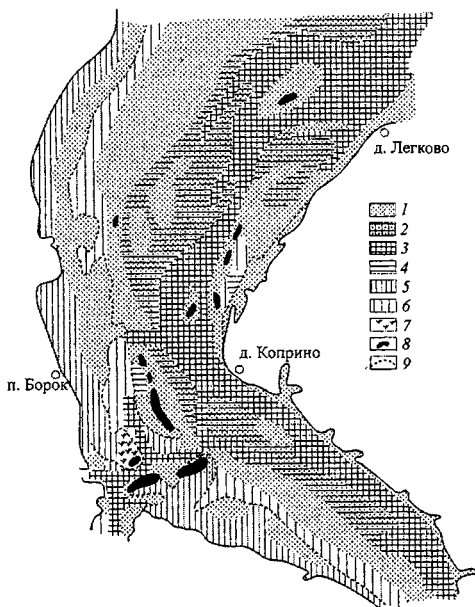


Рис. 4.17. Карты-схемы распределения грунтов в Волжском плесе Рыбинского водохранилища в 1992 г.:

1 — песок, илистый песок; 2—4 — песчанистый, глинистый и торфянистый илы соответственно; 5 — разбухшие, заболачивающиеся почвы; 6 — обнаженные почвы; 7 — отложения из макрофитов; 8 — острова; 9 — граница озобаты 1,5 м

ной зоны равнодействующая волнового режима также перпендикулярна к береговой черте, но ее величины минимальные. Несмотря на отмеченное в этом районе проявление эрозионных процессов и, как следствие, наличие песчанистых отложений, следует предположить и возможность протекания процессов аккумуляции с переотложением донных наносов. В целом на мелководьях рассматриваемой части Волжского плеса Рыбинского водохранилища абразионные процессы преобладают над аккумуляционными (рис. 4.17).

Пространственное положение зон преобладающего влияния волн и течений, ответственных за перераспределение донных отложений и формирование качества местообитаний гидробионтов в мелководной (до 4 м глубины) и траисседиментационной (глубины 4—10 м) зонах, всецело зависит от гидрометеорологического режима водоема. При средних по силе наиболее часто повторяющихся в безледный период ветрах северо-западного направления и расходе воды по р. Волге 50 % обеспеченности (400 м³/с) на большей части плеса преобладающее влияние оказывает ветровое течение. Ветровое волнение в большей степени проявляется на обширном мелководье в северо-западной части плеса. Здесь же отмечена узкая полоса эрозии дна волновыми потоками (рис. 4.18 а). Усиление скорости ветра до штормовых значений способствует сокращению зон преобладающего влияния ветровых течений, увеличению областей волнового воздействия, сопровождающегося интенсивной эрозией дна (рис. 4.18 б).

Дальнейшее районирование мелководий по степени проявления динамических процессов с учетом комплекса гидрологических и гидробиологических характеристик создает основу для разработки мероприятий по реконструкции мелководных местообитаний гидробионтов (изменению их гидрологического режима) в целях повышения биологической продуктивности как отдельных участков водохранилищ, так и в целом всего водоема [13].

4.5. Регрессионные модели распределения гидробионтов под действием динамики вод

Как уже отмечалось выше (гл. I), особым классом моделей, описывающих детерминированную основу процесса, являются регрессионные модели. Такие модели, как правило, используются для общего описания причинных зависимостей между основными переменными [77]. В случае линейной регрессии эти модели имеют вид [89]: $f(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_i a_i x_i$, где \bar{a} —

вектор неизвестных коэффициентов, \bar{x} — вектор переменных.

Следует отметить, что применение регрессионных моделей для прогнозирования в экологических системах часто сопровождается невыполнением некоторых предпосылок классического регрессионного анализа (в частности, предпосылки об отсутствии автокорреляции ошибок) из-за

влияния неочениваемого фактора времени, некоторых других, не включенных в модель переменных, и т. п. Вид выбранной регрессионной модели тоже является достаточно субъективным, «навязанным» системе исследователем [69]. Тем не менее, осторожное использование таких моделей в заданных пределах переменных приемлемо для оценочного прогнозирования распределения гидробионтов ввиду затруднительности проведения экспериментов.

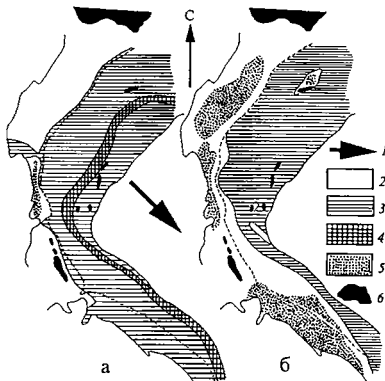


Рис. 4.18. Зоны преобладающего влияния ветровых волн и течений в Волжском плесе Рыбинского водохранилища при северо-западном ветре скоростью 6 м/с (а) и 15 м/с (б): 1 — направление ветра; 2—4 — преобладающее влияние волн, ветровых течений и стоковых течений соответственно; 5 — эрозия дна; 6 — острова

В результате статистической обработки многолетней гидрологической и гидробиологической информации, собранной на водохранилищах Верхней Волги и некоторых озерах верхневолжского бассейна, удалось построить ряд регрессионных моделей, описывающих распределение гидробионтов под действием динамики вод, оценить их достоверность и определить пределы использования.

Так, статистический анализ значений плотностей рыб (P , экз/м²) на открытом мелководье в Волжском плесе Рыбинского водохранилища, зафиксированных при различных отметках уровня (Z , м), скорости ветра

(W , м/с) и средней по глубине скорости ветрового течения (V , м/с), позволил установить ряд важных, на наш взгляд, регрессионных зависимостей при критерии Фишера >5 :

$$P = f(Z): P = -28,8 + 0,21Z \quad (n = 13, R^2 = 0,66), \quad (59)$$

при изменении Z от 99,6 до 101,8 м БС.

$$P(\%) = f(\Delta Z): P = 36,5 + 26,5\Delta Z \quad (n = 10, R^2 = 0,56), \quad (60)$$

где ΔZ — заданное отклонение уровня от НПУ в диапазоне 0—2 м.

$$P = f(Z, W): P = -11,9 + 0,12Z - 0,04W \quad (n = 24, R^2 = 0,63) \quad (61)$$

при изменении Z от 99,4 до 101,8 м БС и W — от 0 до 8 м/с — нижней границы значений штормовой скорости ветра [37].

$$P = f(Z, V): P = -8,5 + 0,09Z - 0,03V \quad (n = 24, R^2 = 0,72) \quad (62)$$

при изменении Z от 99,4 до 101,8 м БС и V — от 0 до 20 см/с.

Вычисление средней по глубине скорости ветрового течения (V) производится по формуле (16).

Расчет плотности рыб по уравнению (61) показывает, что при НПУ и штилевых условиях формируются плотные пойменные скопления рыб. С усилением ветра скопления рассредоточиваются и при достижении его скорости ~ 8—9 м/с рыбы уходят с мелководья на более глубокие участки. При понижении уровня на 2 м для создания неблагоприятных гидродинамических условий на оставшейся части мелководья достаточно даже слабого ветра скоростью 1—2 м/с. Расчет плотностей рыб по уравнению (62) позволяет построить дополнительно пространственную картину распределения рыб при различных отметках уровня и ветровых условиях на определенном участке акватории водохранилища. Использование же уравнения (60) может быть полезно для оценки изменения плотности рыб на мелководье в зависимости от различных сочетаний скорости ветра и понижения уровня воды.

Для оценки степени зарастаемости мелководий воздушно-водной растительностью и, соответственно, качества нерестилищ применение формул табл. 2.7 (гл. II) позволяет получить пространственное распределение плотности отдельных видов макрофитов для водоемов и участков водохранилищ, сопоставимых по своим морфометрическим характеристикам с указанными в таблице (озера Неро и Плещеево, Волжский плес Рыбинского водохранилища).

Для характеристики количественного развития фито- и зоопланктона нами были выбраны его биомасса (B_z) и отдельно для фито- и зоопланктона — содержание хлорофилла «а» ($Хл$). Причем, в целях сравнения превышения в концентрациях $Хл$ и B_z без учета особенностей развития водорослей и планктонных животных в сезонном и многолетнем циклах рассчитывалось

относительное содержание X_l и B_z путем нормирования их значений на станциях для каждой съемки соответственно по минимальным значениям:

$$X_{l_{om}} = X_l \cdot a'' / X_{l_{min}}, \quad B_{z_{om}} = B_z / B_{z_{min}}$$

Сложность структуры циркуляции характеризовалась количественными показателями — выборочной круговой дисперсией направления переноса воды (завихренности — V_m) на локальных участках водоема и средней скоростью переноса воды, отражающей его интенсивность на этом же участке (V_{cp}):

$$V_m = 1 - r; \quad r = \sqrt{B^2 + C^2};$$

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i; \quad \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i$$

$$V_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$$

где α_i — направление течения в некоторой точке выделенной области; n — количество точек на выбранном участке; R^2 — коэффициент множественной детерминации.

Диапазон изменения V_{cp} и V_m в приведенных формулах соответственно составил 0,2—5 см/с и 0,02—0,8. Расчет по уравнениям (63)—(71) может выполняться как для каждого узла сеточной области, так и для выбранных квадратов, включающих ряд узловых точек. В последнем случае размеры квадрата, по которому рассчитывается V_m , могут выбираться, например, исходя из характерных размеров скоплений планктона или рыб.

Применительно к глубоководной зоне Главного плеса Рыбинского водохранилища установлены регрессионные зависимости распределения относительного содержания хлорофилла «а» ($X_{l_{om}}$), относительной биомассы зоопланктона ($B_{z_{om}}$) и бентоса ($B_{b_{om}}$), плотности рыб пелагического ($Пп$) и донного ($Пд$) комплекса от скорости интегрального переноса воды (V) и параметра его завихренности (V_m) при критериях Фишера >30:

$$X_{l_{om}} = 1,994 + 6,8V_m, \quad (n = 36, R^2 = 0,56), \quad (63)$$

$$B_{z_{om}} = 1,1 + 5,4V_m, \quad (n = 37, R^2 = 0,5), \quad (64)$$

$$B_{b_{om}} = -0,74 + 11,4V_m, \quad (n = 35, R^2 = 0,72), \quad (65)$$

$$Пп = 5,6 + 8,8V_m - 1,9V_{cp}, \quad (n = 27, R^2 = 0,84), \quad (66)$$

$$Пn = -0,3 + 14,5V_m, (n = 27, R^2 = 0,77), \quad (67)$$

$$Пn = 12,5 - 3,6V_{cp}, (n = 27, R^2 = 0,73), \quad (68)$$

$$П\delta = 3,8 + 12,3V_m - 1,4V_{cp}, (n = 26, R^2 = 0,91), \quad (69)$$

$$П\delta = -0,55 + 16,8V_m, (n = 26, R^2 = 0,86), \quad (70)$$

$$П\delta = 12,5 - 3,6V_{cp}, (n = 26, R^2 = 0,7), \quad (71)$$

где плотность рыб оценивается в баллах (10 соответствует повышенной плотности скоплений, 5 — средней плотности и 1 — пониженной плотности).

Вычисления по уравнениям (63)—(71) показывают, что наиболее плотные скопления планктона и рыб наблюдаются в пределах вихревых образований с наибольшими значениями V_m . Кроме того, необходимым дополнительным условием устойчивых скоплений гидробионтов является наличие зон наименьших скоростей переноса воды, приуроченных, как правило, к центральным частям круговоротов.

Зависимость распределения плотностей рыб ($П_p$) от скорости течения в русловой зоне исследованных участков верхневолжских водохранилищ достаточно точно описывается степенной функцией $y = ax^b$. При расходах по р. Волге ~ 900 — $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ и скоростях интегрального переноса воды до 30 — 40 см/с уравнение связи имеет вид:

$$П_p = 16,97V_{cp}^{-1,96}, (n = 35, R^2 = 0,94). \quad (72)$$

В случае малых расходов воды (~ 200 — $300 \text{ м}^3/\text{с}$) уравнение связи несколько отличается от предыдущего:

$$П_p = 0,17V_{cp}^{-0,66} (n = 18, R^2 = 0,81). \quad (73)$$

Расчеты по формулам (72)—(73), подтвержденные данными натурных наблюдений, показывают, что рыбы в основном приурочены к участкам пониженных скоростей ($< 15 \text{ см/с}$) на периферии осн стокового течения. Выявленные закономерности распределения скоплений пелагических рыб в зависимости от структуры русловых течений достаточно хорошо согласуются с результатами исследований поведения и распределения рыб на крупных водотоках [92].

Заключение

Данная книга-руководство — первая попытка обобщения подходов и методов математического моделирования воздействия гидродинамических и антропогенных факторов на распределение отдельных видов гидробионтов в озерах и водохранилищах. Основной гидродинамический блок программного комплекса составляет стационарная модель ветровых течений, достаточно хорошо зарекомендовавшая себя для условий водохранилищ. Тем не менее, в процессе накопления знаний о гидрофизической структуре водоема или в зависимости от задач исследований этот блок может быть заменен на более совершенные нестационарные гидродинамические (термогидродинамические) модели. Уточнению и совершенствованию могут также подлежать используемые методы расчета параметров прибрежных динамических процессов.

Программный комплекс написан на языке программирования ФОРТРАН для любого IBM — совместимого компьютера. Комплекс является системой программ, открытой для расширения и модификации благодаря модульной структуре и единому информационному пространству, т. е. может быть дополнен другими блоками-моделями, позволяющими расширить представление о тех или иных внутриводоемных процессах и оценить в прикладном аспекте их влияние на функционирование экосистемы водоема. Иными словами, пользователь вправе сам формировать программный комплекс в зависимости от конкретных задач исследований на разнотипных озерах и водохранилищах.

На сегодняшний день отдельные блоки программного комплекса нуждаются в доработке, так как полная их верификация была невозможна из-за отсутствия необходимого полевого материала. Использование блоковых моделей на других водоемах позволит уточнить как границы применения программного комплекса, так и детализировать структуру самих моделей, повысить их эффективность.

Литература

1. *Авакян А. Б., Литвинов А. С., Поддубный С. А.* Гидролого-географические исследования водохранилищ // Географические направления в гидрологии. М., 1995. С. 180—191.
2. *Авакян А. Б., Широков В. М.* Рациональное использование и охрана водных ресурсов. Екатеринбург: изд-во «Виктор», 1994. 319 с.
3. *Аверкиев А. С., Густов Д. В., Чанцев В. Ю.* Расчет циркуляции вод и переноса гидробионтов в промысловых бассейнах с использованием комплекса «Маркер» // 10 Междунар. конф. по промысл. океанол., СПб, 20—23 мая, 1997: Тез. докл. М., 1997. С. 9—10.
4. *Авинская Е. В.* Распределение фитопланктона в озере Ильмень // Тр. ГосНИОРХ. 1987. № 264. С. 97—106.
5. *Алексеевский Н. И., Михинов А. Е.* Формирование и динамика наносов в речной сети и береговой зоне водоемов // Итоги науки и техники. Сер. Гидрология суши. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 8. 183 с.
6. *Бакастов С. С., Литвинов А. С.* Опыт расчета горизонтального переноса сообществ планктона // Биология и физиология пресноводных организмов. Л., 1971. С. 217—223.
7. *Белякова И. В.* Зообентос как индикатор загрязнения Волховской губы Ладожского озера, рек Волхов и Сясь // Тез. докл. междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» 19—23 ноября 1995 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского ун-та, 1995. С. 124—125.
8. *Бояринцев Е. Л., Сербов Н. Г.* Термическое загрязнение рек Северо-Востока России под влиянием разработок россыпных месторождений // Тр. V конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» 22—26 ноября 1999 г. М., 1999. С. 106—108.
9. *Брагинский Л. П., Береза В. Д., Величко И. М.* и др. Пятна цветения, игоновые массы, выбросы сине-зеленых водорослей и происходящие в них процессы // Цветение воды. Киев, 1968. С. 92—149.
10. *Бреховских В. Ф., Волкова З. В., Вишневская Г. Н.* Изменение элементов экосистем в подводных карьерах для добычи нерудных строительных материалов // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 4. С. 448—454.
11. *Воронцов Ф. Ф., Распопов И. М., Слепухина Т. Д.* Фактор волновой активности в формировании экосистем мелководных озер Северо-Запада СССР // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера. Петрозаводск, 1981. С. 6—7.
12. Временные указания по оценке повышения мутности при землечерпательных работах, проводимых для обеспечения транзитного судоходства на реках, и учету ее влияния на качество воды и экологию гидробионтов. Утв. Гл. упр. вод. путей и гидротех. сооружений М-ва реч. флота РСФСР 27.11.86. М. 1986. 57 с.
13. *Герасимов Ю. В., Поддубный С. А.* Роль гидрологического режима в

формировании скоплений рыб на мелководья равнинных водохранилищ. Ярославль: изд-во ЯГТУ, 1999. 172 с.

14. Гидрохимический бюллетень. Архангельск. 1982. № 2 (59). 200 с.
15. Гидрохимический бюллетень. Архангельск. 1983. № 2 (63). 199 с.
16. Гидрохимический бюллетень. Архангельск. 1983. № 3 (64). 180 с.
17. Горбунова А. В. Влияние повышенной мутности на зоопланктон // Гидромеханизация и проблемы охраны окружающей среды. М., 1981, 50 с.
18. Данилов-Данильян В. И., Горшков В. Г., Арский Ю. М., Лосев К. С. Окружающая среда между прошлым и будущим: мир и Россия (опыт эколого-экономического анализа). М.: ВИНТИ, 1994. 134 с.
19. Даценко Ю. С., Эдельштейн К. К. Основы управления водными экосистемами: Метод. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 108 с.
20. Дебольский В. К., Долгополова Е. Н., Орлов А. С., Вещев П. В. К расчету распространения предличинки осетровых рыб в турбулентном потоке // Водные ресурсы. 1986. № 1. С. 102—104.
21. Демин Ю. Л., Ахвердиев И. О., Литвинов А. С., Поддубный С. А. О роли бароклинных эффектов в динамике Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 1991. № 4. С. 55—65.
22. Дружинин Г. В., Короткевич О. Е., Смирнова Т. С. О связи развития зоопланктона с распределением водных масс в оз. Ильмень // Биология внутренних вод: Информ. бюл. Л.: Наука, 1983. № 57. С. 15—19.
23. Жарикова Т. И. Влияние антропогенного загрязнения водоемов на эктопаразитов леща (*Abramis brama*) // Зоологический журнал. 1993. Т. 72. Вып. 2. С. 73—83.
24. Законнов В. В., Поддубный С. А. Изменение структуры донных отложений в Рыбинском водохранилище // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 200—209.
25. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
26. Карпушинский А. В. Влияние суточной изменчивости абиотических условий на распределение и продуцирование фитопланктона оз. Байкал // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 1. С. 66—73.
27. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
28. Китаев С. П. Ихтиомасса и рыбопродукция малых и средних озер и способы их определения. СПб.: Наука, 1994. 177 с.
29. Конабеева В. К., Поддубный А. Г. К прогнозированию распределения ранней молоди рыб в водоеме // Вопросы ихтиологии. 1982. Т. 22. № 4. С. 619—625.
30. Корнева Л. Г. Фитопланктон Рыбинского водохранилища: состав, особенности распределения, последствия эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб., 1993. С. 50—113.
31. Крейман К. Д., Голосов С. Д., Сквородова Е. Л. Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Водные ресурсы. 1992. № 2. С. 52—57.

32. Кулеш В. П. Гидродинамическая модель стоковой и ветровой циркуляции оз. Ильмень // Охрана окружающей среды от загрязнения промышленными выбросами ЦПБ. Л., 1988. С. 45—52.
33. Курашов Е. А. Влияние бытовых и промышленных стоков на структуру и распределение меобентоса в больших озерах // Тез. Докл. Междунар. Конфер. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» 19—23 ноября 1995 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского ун-та, 1995. С. 145—146.
34. Курейшев А. В., Новиков Б. И. Учет гидрометеорологических факторов при составлении схем распределения фитопланктона и хлорофилла в днепровских водохранилищах // Гидробиологический журнал. 1985. Т. XXI. № 4. С. 79—85.
35. Лабзовский Н. А. Расчет элементов волн в озерах и водохранилищах // Тр. Гос. гидрол. ин-та. 1976. Вып. 231. С. 126—143.
36. Лесников Л. А. Влияние перемещения грунта на рыбохозяйственные водоемы // Тр. ГосНИОРХ. 1986. Вып. 255. С. 3—9.
37. Малинин Л. К., Литвинов А. С. О вертикальном распределении рыб в глубоководных плесах озер и водохранилищ // Тр. Всесоюз. совещ. по вопросам поведения рыб. М., 1991. С. 61—74.
38. Мажейкайте С. И., Смирнова Т. С., Савина О. И. и др. Распределение планктонных простейших в Ладожском озере как один из показателей неоднородности его вод // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 118—121.
39. Математические модели и методы управления крупномасштабным водным объектом. Новосибирск: Наука, 1987. 200 с.
40. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А. В. Караушева. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 286 с.
41. Методы и результаты расчета циркуляции вод Мирового океана / Саркисян А. С., Демин Ю. Л., Бреховских А. Л., Шаханова Т. В. : Под ред. А. С. Саркисяна, Ю. Л. Демина. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 152 с.
42. Минеева Н. М. Формирование первичной продукции планктона Рыбинского водохранилища в летний период // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб., 1993. С. 114—140.
43. Модринский Н. И. Геодезия. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 464 с.
44. Николаев А. С. Горизонтальное распределение и миграция пелагической молодежи нерки *Oncorhynchus nerka* в Курильском озере (Камчатка) // Вопросы ихтиологии. 1988. Т. 28. Вып. 6. С. 961—970.
45. Остроухов А. В., Шамраев Ю. И. Морская гидрометрия. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 446 с.
46. Охрана окружающей среды: Справочник // Сост. Л.П. Шариков. Л.: Судостроение, 1978. 560 с.
47. Павлов Д. С. Биологические основы управления поведением рыб в потоке воды. М.: Наука, 1979. 319 с.
48. Папченков В. Г. Водная растительность Горьковского водохрани-

лища в зоне влияния Костромской ГРЭС // Биология внутренних вод: Информ. бюл. СПб.: Наука, 1996. № 100. С. 15—18.

49. *Пермитин И. Е., Половков В. В.* Особенности образования и динамика структуры скоплений пелагических рыб // Теоретические аспекты рыбохозяйственных исследований водохранилищ. Л., 1978. С. 78—105.

50. *Петрова Н. А., Уварова В. И., Бутакова Т. А.* Влияние добычи нерудных строительных материалов на гидробионтов в русле реки Иртыш // Тр. ГосНИОРХ, 1989. Вып. 305. С. 135—145.

51. *Поддубный А. Г.* Экологическая топография популяций рыб в водохранилищах. Л.: Наука, 1971. С. 312.

52. *Поддубный А. Г., Малинин Л. К.* Миграции рыб во внутренних водоемах. М.: Агропромиздат, 1988. 222 с.

53. *Поддубный А. Г., Баканов А. И., Сметанин М. М.* и др. Опыт экологического районирования Рыбинского водохранилища // Экологическое районирование пресноводных водоемов. Рыбинск, 1990. С. 83—144.

54. *Поддубный С. А.* Расчет вертикальной составляющей скорости течения в Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод: Информ. бюл. 1985. № 65. С. 46—49.

55. *Поддубный С. А.* Комплексный метод верификации гидродинамических моделей // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб., 1993. С. 47—65.

56. *Поддубный С. А.* Связи распределения гидробионтов и элементов циркуляции вод на различных биотопах внутренних водоемов // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 2. С. 205—213.

57. *Поддубный С. А., Бычкова М. Б.* О методе выделения областей влияния ветрового волнения и течения в прибрежной зоне водохранилищ // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 730—737.

58. *Поддубный С. А., Базаров М. И., Фурса Н. Н.* Роль течений в распределении пелагических рыб в озере Плесеево // Функционирование озерных экосистем. — Рыбинск, 1983. С. 159—164.

59. *Поддубный С. А., Корнева Л. Г., Минеева Н. М.* Влияние горизонтальной циркуляции вод на распределение фитопланктона в Рыбинском водохранилище // Водные ресурсы. 1990. № 2. С. 148—153.

60. *Поддубный С. А., Голованов В. К., Базаров М. И., Кудряков С. В.* Влияние термогидродинамических условий в зоне сбросных расходов Костромской ГРЭС на распределение рыб // Энергетическое строительство. 1995. № 6. С. 38—41.

61. *Поддубный С. А., Кудряков С. В., Законнов В. В., Бычкова М. Б.* Оперативная оценка распространения мутности при подводной добыче нерудных строительных материалов // Энергетическое строительство. 1994. № 3. С. 74—77.

62. *Поддубный С. А., Сухова Э. В.* О моделировании перемещения скоплений гидробионтов в водохранилищах // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 3. С. 457—465.

63. Поддубный С. А., Сухова Э. В. Методы математического моделирования течений и перемещения рыб для оценки пригодности различных конструкций рыбозащитных устройств // Гидротехническое строительство. 2002. № 5. С. 35—40.

64. Пуклаков В. В. Гидрологическая модель водохранилища: руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.

65. Распопов И. М., Слепухина Т. Д., Воронцов Ф. Ф., Рычкова М. А. Динамика вод и формирование биоценозов литорали (на примере Кубенского озера) // Экология. 1978. № 6. С. 83—86.

66. Рекомендации по расчетам течений в шельфовой зоне морей / Под ред. Б. Х. Глуховского. М.: ГОИН, 1979. 177 с.

67. Ривьер И. К. Особенности функционирования зоопланктонных сообществ водоемов различных типов // Структура и функционирование пресноводных экосистем. Л., 1988. С. 81—96.

68. Ривьер И. К. Современное состояние зоопланктона Рыбинского водохранилища // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб., 1993. С. 205—232.

69. Розенберг Г. С. Сравнение различных методов экологического прогнозирования. Прогноз структуры экосистем. Экология. 1980. № 4. С. 5—12.

70. Роль волиения в формировании биоценозов бентоса больших озер / Распопов И. Н., Воронцов Ф. Ф., Слепухина Т. Д. и др. Л.: Наука, 1990. 114 с.

71. Рыбинское водохранилище и его жизнь / Под ред. Б. С. Кузина. Л.: Наука, 1972. 360 с.

72. Сеидов Д. Г., Марушкевич А. Д. О расчете траекторий частиц в модели синоптических вихрей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 5. С. 412—421.

73. Селезнев В. А., Селезнева А. В. Оценка воздействия сточных вод Тольятти на качество вод Саратовского водохранилища // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 3. С. 356—360.

74. Селюк Е. М. Исследования, расчеты и прогнозы ветрового волнения на водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 220 с.

75. Семенова Л. М. О вертикальном распределении и суточных миграциях *Bosmina coregoni baird.* в Рыбинском водохранилище // Биология и физиология пресноводных организмов. Л., 1971. С. 91—94.

76. Скоробогатов М. А., Павлов Д. С., Лундин А. И. Влияние скорости течения и интенсивности турбулентности на распределение плотвы *Rutilus Rutilus* в потоке воды // Вопросы ихтиологии. 1996. Т. 36. № 5. С. 686—692.

77. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 376 с.

78. Строительные нормы и правила (СНиП) 2.06.04—82. Нагрузка и воздействие на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1983. 38 с.

79. Судольский А. С. Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 262 с.

80. Сярки М. Т. Зоопланктон Кондопожской губы Онежского озера в условиях антропогенного воздействия // Тез. Докл. Междунар. Конфер. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» 19—23 ноября 1995 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского ун-та, 1995. С. 113—114.

81. Терещенко В. Г., Линник В. Д. Влияние ветрового волнения на распределение скоплений рыб // Биология внутренних вод: Информ. бюл. СПб: Наука, 1994. № 97. С. 37—40.

82. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. Киев: Наук. думка, 1990. 240 с.

83. Тимченко В. М., Коробка А. А. О влиянии течений на распределение фитопланктона в водоемах (на примере Кременчугского водохранилища) // Гидробиологический журнал. 1999. Т. 35. № 2. С. 90—96.

84. Тушинский С. Г. Качество природных вод: наблюдение и прогнозирование // Итоги науки и техники ВИНТИ. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. М., 1987 б. Т. 18. 193 с.

85. Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Наука, 1960. 127 с.

86. Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 200 с.

87. Филатова Т. Н. Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат. 1972. 319 с.

88. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 335 с.

89. Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Сов. радио, 1975. 400 с.

90. Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.

91. Экологические факторы пространственного распределения и перемещения гидробионтов / Под ред. А. Г. Поддубного. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 333 с.

92. Экологический способ защиты рыб на повороте струй открытого потока / Павлов Д. С., Барекян А. Ш., Рипинский И. И. и др. М.: Наука, 1982. 112 с.

93. Экология организмов водохранилищ-охладителей / Под ред. Н. В. Буторина. Л.: Наука, 1975. 290 с.

94. Электроэнергетика и природа (экологические проблемы развития электроэнергетики) / Под ред. Г. Н. Лялика, А. Ш. Резниковского. М.: Энергоатомиздат, 1995. 352 с.

95. Allender J. H. Comparison of model and observed currents in Lake Michigan // J. of Physical Oceanogr. 1977. V. 7. P. 711—718.

96. Carrick H. J., Aldridge F., Schelske C. L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow productive lake // Limnol. And Oceanogr. 1993. № 33. P. 1179—1192.

97. French R. H. Lake modeling: state of the art. CRC Crit. Rev. Environ. Contr. 1984. V.13. № 4. P.311—357.

98. Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate, and risk assessment / Ed. by Gary M. Rand. Washington, Taylor & Francis, 1995. 1125 p.

99. Higo M., Watanabe T. Biological classification of the water mass in the Southern basin of lake Biwa, using similarity index on pelagic epilithic diatom communities // J. Limnol. 1978. V. 39. № 3. P. 130—136.

100. Kalikhman I., Walline P., Gophen M. Simultaneous pattern of temperature, oxygen, zooplankton and fish distribution in Lake Kinneret, Israel // Freshwater Biol. 1992. V. 28. № 3. P. 337—347.

101. Kuo J.-T., Thomann R. V. Phytoplankton modeling in the Embayments of Lakes // J. Environ. Eng. 1983. V. 109. № 6. P. 1311—1332.

102. Makarevich V. A. Qualitative analysis of ocean and modeling results // Ecol. Model. 1991. V. 56. № 1—4. P. 1—32.

103. Reynolds C. S. The ecology of freshwater phytoplankton // Cambridge University Press, 1984. 384 p.

104. Rishards S. A., Possighman H. P., Noye B. J. Larval dispersion along a straight coast with tidal current: Complex distribution patterns from a simple model // Mar. Ecol. Progr. Ser. 1995. V. 122. № 1—3. P. 59—71.

105. Simons T. J. Circulation models of lakes and inland seas. // Can. Bull. Fish. and Aquat. Sci., 1980. V. VIII. № 203. 146 p.

106. Stemborgem K. S. The influence of mixing on rotifer assemblages of Michigan lakes // Hidrobiologia. 1995. V. 297. № 2. P. 149—161.

107. Tufford D. L., McKellar H. N. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain // Ecological Modelling. 1999. № 114. P. 137—173.

108. Verhagen J. H. G. Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes // Limnol. and Oceanogr. 1994. V. 39. № 7. P. 1550—1565.

109. Webster I. T., Hutchinson P. H. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited // Limnol. and Oceanogr. 1994. V. 39. № 2. P. 365—373.

110. Wroblewski J. S. Interaction of currents and vertical migration in maintaining *Calanus marshallae* in the Oregon upwelling zone — a simulation // Deep-Sea Res. 1982. V. A29. № 6. P. 665—686.

111. Yamazaki H., Kamykowski D. The vertical trajectories motile phytoplankton in a wind-mixed water column // Deep-Sea Res. A. 1991. V. 38. № 2. P. 219—241.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Гидродинамическое и антропогенное воздействие на экосистемы внутренних водоемов — состояние вопроса	5
1.1. Динамика вод и живые организмы	5
1.2. Антропогенное воздействие на водные экосистемы	7
1.3. Моделирование влияния абиотических факторов на распределение гидробионтов	11
Глава 2. Представление моделей программного комплекса	15
2.1. Общие сведения	15
2.2. Выбор, верификация, допущения и ограничения моделей	17
2.2.1. Блок «FFF»	17
2.2.2. Блок «LAGRANGE»	26
2.2.3. Блок «TURBIDITY»	30
2.2.4. Блок «WAVE»	32
2.2.5. Блок «BOTTAN»	35
2.2.6. Блок «PLANT»	37
Глава 3. Описание программных модулей комплекса	41
3.1. Организация работы в программном комплексе	41
3.2. Программы блока «FFF»	42
3.2.1. Алгоритм расчетов	42
3.2.2. Исходные данные и работа программы	45
3.2.3. Результаты расчетов	51
3.3. Программы блока «LAGRANGE»	54
3.3.1. Алгоритм расчетов	54
3.3.2. Исходные данные и работа программы	55
3.3.3. Результаты расчетов	57
3.4. Программы блока «TURBIDITY»	58
3.4.1. Алгоритм расчетов	58
3.4.2. Исходные данные и работа программ	62
3.4.3. Результаты расчетов	64
3.5. Программы блока «WAVE»	65
3.5.1. Алгоритм расчетов	65
3.5.2. Исходные данные и работа программ	67
3.5.3. Результаты расчетов	68
3.6. Программы блока «BOTTAN»	70
3.6.1. Алгоритм расчетов	70
3.6.2. Исходные данные и работа программ	72
3.6.3. Результаты расчетов	72
3.7. Программы блока «PLANT»	74
3.7.1. Алгоритм расчетов	74
3.7.2. Исходные данные и работа программы	74
3.7.3. Результаты расчетов	75
Глава 4. Практическое использование моделей	77
4.1. Расчет общей циркуляции вод	77
4.1.1. Описание структуры общей циркуляции вод	77

4.1.2. Оценка роли факторов в формировании общей циркуляции вод.....	84
4.2. Расчет траекторий перемещения объемов воды и скоплений гидробионтов	86
4.2.1. Расчет перемещения единичных объемов воды.	86
4.2.2. Выделение зон аккумуляции биомассы	90
4.3. Расчет распространения взвешенных веществ и сточных вод	92
4.4. Выделение зон преобладающего влияния гидродинамических процессов на дно мелководий	99
4.5. Регрессионные модели распределения гидробионтов под действием динамики вод	102
Заключение	107
Литература	108

С. А. Поддубный, Э. В. Сухова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОБИОНТОВ
В ВОДОХРАНИЛИЩАХ**

Компьютерная верстка: *Матасов А. Н.*
Корректоры: *Смирнова Н. В., Малыгина А. Н.*

Подписано в печать 10.10.2002. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 6,97. Тираж 200 экз.
Заказ 3520.

Издательство ОАО «Рыбинский Дом печати»
Отпечатано в ОАО «Рыбинский Дом печати»
152901, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.