

ВЕТРОВОЕ ВОЛНЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА в Главном плесе РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Выполнен анализ основных характеристик ветрового волнения в центральной части Рыбинского водохранилища и дана оценка вертикального турбулентного обмена. Исследована временная динамика поверхностного квазиоднородного слоя воды в годы разной водности и ветровой активности. Показано, что динамика перемешанного слоя воды в основном определяется силой ветра. При скорости ветра 10 м/с и выше перемешиванием охвачена вся водная масса от поверхности до дна. Значительный вклад во временную изменчивость температуры в термоклине могут вносить внутренние волны.

Введение

Рыбинское водохранилище – озеровидный мелководный водоем. При площади 4550 км² при нормальном подпорном уровне (НПУ) средняя глубина 5,6 м, 20 % площади занимают мелководья с глубинами до 2 м. Площадь Главного плеса составляет около 80 % суммарной площади водохранилища.

Преобладающие направления ветра над акваторией водохранилища – западного, северо-западного и южного направлений, составляющие в среднем около 75 %. Среднемесячная скорость ветра довольно устойчива в весенне-летний период и резко возрастает к осени. Скорость ветра более 6 м/с над акваторией водоема в безледный период имеет 50 %-ную обеспеченность. Повторяемость ветра со скоростью 8-12 м/с составляет 12-15 %. Длина разгона волн при НПУ в направлении с севера (С) на юг (Ю) может превышать 100 км, а с запада (З) на восток (В) (в наиболее широкой части) составляет 56 км. При сработке уровня водохранилища длина разгона волн и глубина водоема по пути разгона уменьшаются, что оказывает серьезное влияние на элементы волн. На водохранилище детальное изучение волнения было начато Рыбинской гидрометеообсерваторией (ГМО) с момента его заполнения и проводилось до 1962 г. [1].

А.С. Литвинов*,

доктор
географических наук,
главный научный
сотрудник,
заведующий
лабораторией
гидрологии
и гидрохимии,
Институт биологии
внутренних вод
им. И.Д. Папанина
РАН

Л.А. Кучай,

научный сотрудник,
лаборатория
гидрологии
и гидрохимии,
Институт биологии
внутренних вод
им. И.Д. Папанина
РАН

Е.Н. Соколова,



Термический режим водоема является функцией приходящего тепла на его поверхность и динамики вод. Детальное изучение термического режима Рыбинского водохранилища лабораторией гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН проводилось в 1960-1964 гг. при организации регулярных синхронных съемок. Исследования температурного режима водохранилища, как экологического фактора, продолжают систематически проводиться в ИБВВ РАН с 1965 г. [2].

Результаты и их обсуждение

Динамический режим водной массы в Главном плесе определяется главным образом скоростью ветра. Термический и динамический режимы неразрывно связаны между собой. По данным Рыбинской ГМО при скорости ветра 5 м/с высота волны

* Адрес для корреспонденции: litvinov@ibiw.yaroslavl.ru

Таблица 1

Элементы волн в центре Главного плеса
Рыбинского водохранилища

Направление ветра	Скорость ветра (м/сек)	Глубина по длине разгона (h м)	Длина Волны (м)	Высота Волны (м)
С	5	5,64	11,28	0,57
Ю	5	4,07	8,13	0,46
З	5	4,85	9,70	0,52
СЗ	5	2,52	5,04	0,34
С	10	11,28	22,56	1,36
Ю	10	8,13	16,27	1,10
З	10	9,70	19,40	1,23
СЗ	10	5,04	10,09	0,80
С	15	16,92	33,84	2,26
Ю	15	12,20	24,40	1,82
З	15	14,55	29,11	2,05
СЗ	15	7,57	15,13	1,32

в центре водохранилища равна 50 см, длина – 6,2 м, период составляет 2 сек. При увеличении скорости ветра до 10 м/с высота волны увеличивается до 110 см, а длина достигает 18 м, период составляет 3,4 сек. На значительной части акватории Главного плеса, при скорости ветра 15 м/с и выше, преобладают волны до 160–200 см. При ветре устойчивого направления высота волны быстро реагирует на изменение скорости ветра. Среднее количество дней за период открытой воды, когда высота волны достигает 100 см в среднем, составляет 20

младший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

сут. Это имеет место при ветрах северного и северо-западного направлений. В мае и июле высота волны от 75 до 100 см имеет наименьшую повторяемость. К концу безледного периода (октябрь), несмотря на значительное количество штормов, высота волны несколько уменьшается, что связано с установлением наиболее низкого уровня [1]. Высота волны 55-65 см в центральной части Главного плеса может наблюдаться в течение половины безледного периода (табл. 1). Характер турбулентных процессов в водоеме во многом обусловлен ветровым волнением. Используя методику мелкого моря выполнена оценка коэффициентов вертикального турбулентного обмена в Главном плесе Рыбинского водохранилища [3]. Согласно выполненным расчетам при скорости ветра 5 м/с величина турбулентного обмена на поверхности составляет $34,9 \text{ гсм}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$, а при скорости ветра 10 м/с увеличивается до $99,3 \text{ гсм}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$ (табл. 2).

С глубиной интенсивность ветрового перемешивания быстро убывает. При скорости ветра 5 м/с на глубине 2 м волновое перемешивание практически отсутствует, а при скорости ветра 10 м/с достигает 6-7 м.

Расчеты коэффициентов вертикального турбулентного обмена при различных характеристиках ветрового волнения в центральной части водохранилища показали, что глубина перемешанного слоя воды в среднем составляет половину длины волны.

Для исследования временной динамики поверхностного квазиоднородного слоя



Таблица 2

Изменение коэффициентов вертикального турбулентного обмена ($\text{гсм}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$) в зависимости от глубины

Горизонт, м	Скорость ветра, м/сек		
	5	10	15
0	34.9	99.3	165.2
1	4.5	49.9	93.8
2	0.7	23.9	51.8
3	0.06	11.8	29.1
4	0.0	5.0	15.5
5	0.0	2.6	8.5
6	0.0	1.4	4.2
7	0.0	0.5	2.1
8	0.0	0.2	0.7
9	0.0	0.03	0.2

воды из непрерывного ряда наблюдений были выбраны 19 лет, разных по водности, ветровой активности и средней температуре воды в водоеме за безледный период. По ежесуточным данным наблюдения за скоростью и направлением ветра в эти годы (данные Рыбинской ГМО) рассчитана глубина перемешанного слоя воды – h (м) для 4-х станций Главного плеса Рыбинского водохранилища. Для расчета использовалась формула длины волны Н.А.Лабзовского [4]: $L = 0,319 \cdot W \cdot \sqrt{D}$, где W – скорость ветра (м/сек), D – разгон волны (км) от береговой линии до расчетной станции в направлении действия ветра. Высота волны была рассчитана по формуле Андреянова В.Г.: $H = 0,0208$

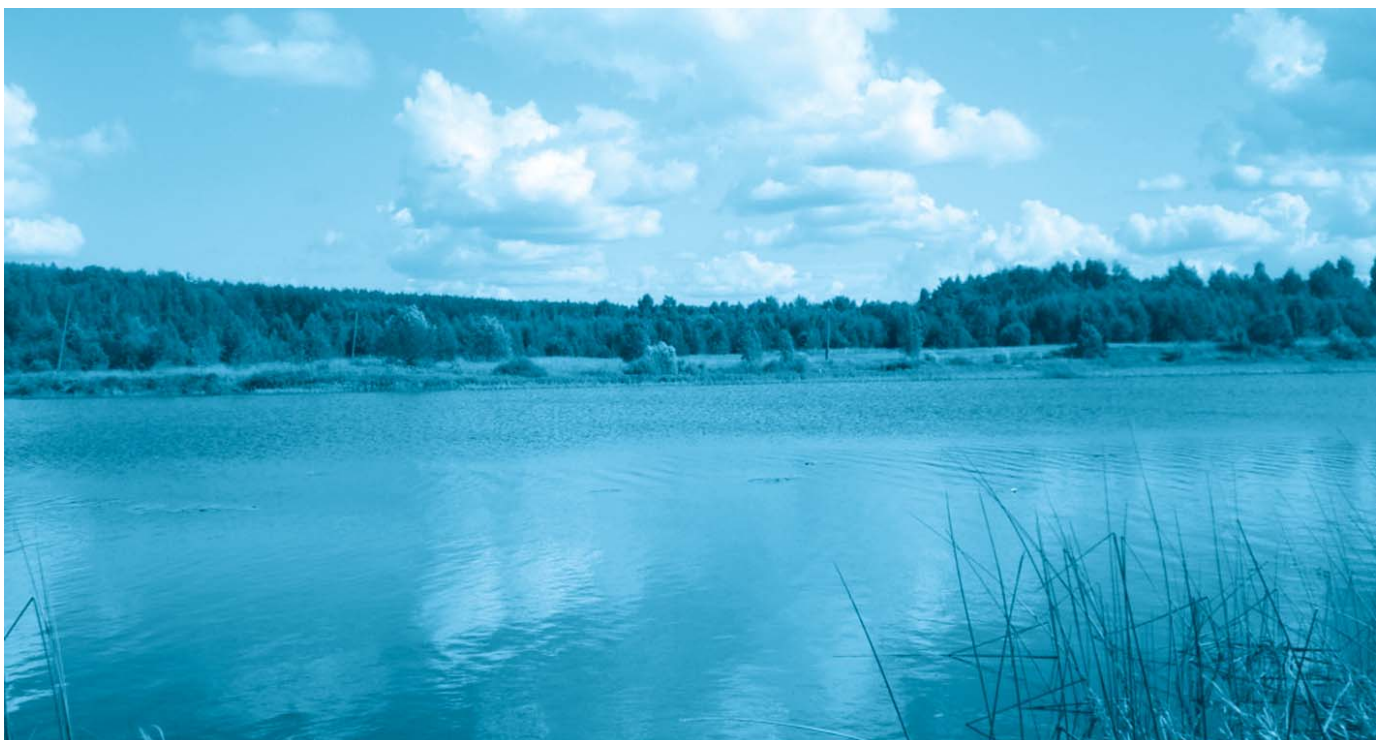
$W^{5/4} \cdot D^{1/3}$ [4]. Разгон волны вычислялся по 16 румбам [5].

В качестве примера на *рис. 1* приведена динамика величины h , рассчитанной по данным 1983 и 2005 гг, многоводных, со средней температурой вегетационного периода выше нормы.

Сильные ветры в 1983 г. способствовали достаточно интенсивному перемешиванию даже в летний период – глубина поверхностного квазиоднородного слоя воды в этот период составляла 7–9.5 м. Слабая ветровая деятельность над поверхностью водоема в 2005 г. привела к образованию поверхностного перемешанного слоя воды в весенне-летний период толщиной, в среднем (за редким исключением), 2-3 м, увеличившейся только в последней декаде осени.

Анализ динамики перемешанного слоя воды показал, что эта величина определяется, в основном, силой ветра и термическая стратификация может нарушаться в течение весенне-летнего периода. Определенной тенденции в межгодовых изменениях продолжительности периода стратификации не наблюдается. В годы, когда средняя температура воздуха ниже нормы, водность повышенная, а ветры сильные, стратификация неустойчива и кратковременна.

Рассчитанные величины толщины поверхностного перемешанного слоя были использованы при моделировании вертикального распределения температуры в двухслойной модели, отражающей стратификацию водной толщи в весенний и летний периоды.



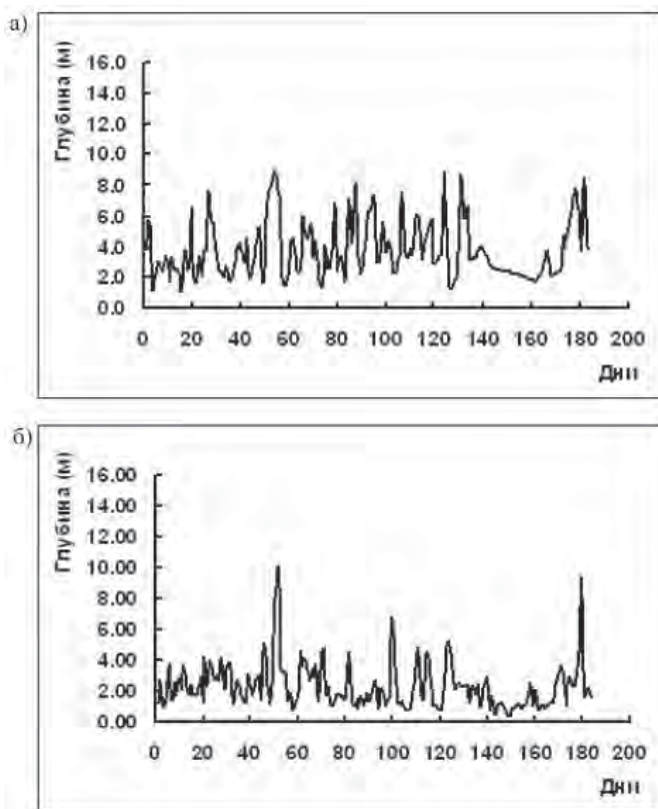


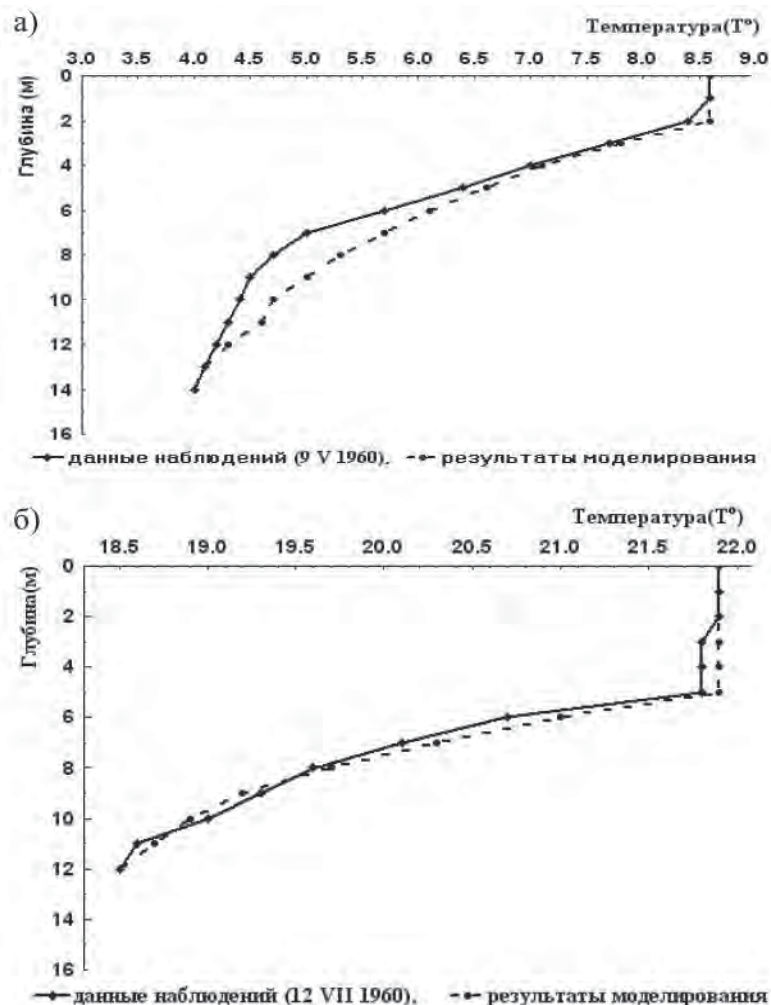
Рис. 1. Динамика толщины поверхностного перемешанного слоя воды в вегетационный период 1983 г. (а) и 2005 г. (б).

Примеры такой стратификации и их модели приведены на рис. 2 и 3.

Период интенсивного весенне-летнего прогрева характеризуется существенными различиями температуры по акватории водохранилища и термическим расслоением водной массы по вертикали. В мае температура по акватории в Главном плесе может изменяться от 5 °С до 14 °С. В маловодные годы весенняя стратификация появляется, когда средняя температура выше нормы и ветер достаточно слабый. Градиенты температуры в слое скачка могут достигать 7-8 °С на 1 м глубины.

Значительный вклад во временную изменчивость температуры в термоклине могут вносить внутренние волны различного периода. В конце мая 1979 г. при температуре воды в верхнем 4-х метровом слое 13-14 °С, а глубже 8 м – 7-6 °С, в термоклине на горизонте 4 м флуктуации температуры в течение суток достигали 9 °С. При этом были выделены колебания с периодами от 10 мин до 10,5 ч [6]. Основным источником внутренних волн в период термического расслоения может

Рис. 2. Пример весенней и летней стратификации водной толщи в Главном плесе (а, б). →



служить неравномерность работы гидросооружений водохранилища и кратковременные усиления ветра (шквалы).

Заключение

В Главном плесе Рыбинского водохранилища наибольшие размеры и наибольшую повторяемость элементы волн имеют при ветрах северного и северо-западного направлений, наименьшую – южного и юго-восточного. Максимальные элементы волн 1 % обеспеченности могут наблюдаться при скорости ветра выше 15 м/с.

Расчеты коэффициентов вертикального турбулентного обмена при различных характеристиках ветрового волнения в центральной части водохранилища показали, что при скорости ветра 10 м/с и выше ветровое перемешивание охватывает всю водную толщу от поверхности до дна.

В годы, когда средняя температура воздуха ниже нормы, влажность повышенная, а ветры сильные, гомотермия устанавливается на продолжительное время. Стратификация в таких условиях неустойчива, кратковременна и совпадает с тихой погодой. При слабых

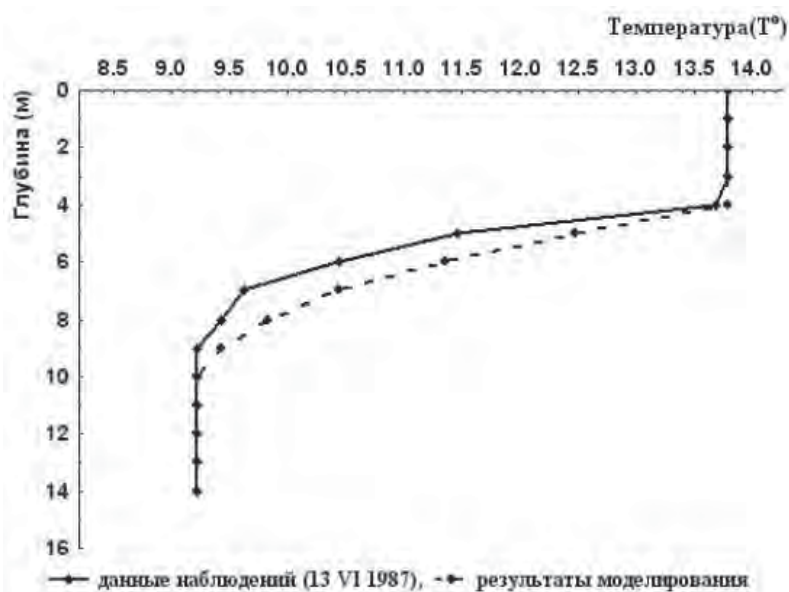


Рис. 3. Пример сформировавшегося летнего термоклина.

ветрах устойчивое расслоение с толщиной поверхностного квазигомогенного слоя воды 2,5–3 м сохраняется до середины июля. Определенной тенденции в межгодовых изменениях продолжительности периода неустойчивой весенней стратификации не обнаруживается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 10-05-00593.

Ключевые слова:

ветровое волнение,
глубина
перемешивания,
термическая
структура

Литература

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
2. Буторин Н.В. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища / Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С.//Л.: Наука. 1982. 223 с.
3. Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль: 2000. 81 с.
4. Богословский Б.Б. Озероведение. М.: МГУ, 1960. 335 с.
5. Кучай Л.А. Анализ многолетних и сезонных изменений термической структуры и толщины поверхностного квазигомогенного слоя воды Рыбинского водохранилища. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. / Кучай Л.А., Литвинов А.С., Соколова Е.Н. // Тр. Международной научн.-практ. конференции. т. I, Пермь: 2009. С. 67-71.
6. Лифшиц В.Х. Пространственно-временная изменчивость температуры воды в Рыбинском водохранилище по данным автономных и дистанционных измерений / Лифшиц В.Х., Бархотова И.В., Литвинов А.С. // Биология внутренних вод. АН СССР. Информ. бюлл. 1984. № 63. С. 64-68.



A.S. Litvinov, L.A. Kuchay, E.N. Sokolova

WIND WAVES AND THERMAL STRUCTURE IN THE MAIN REACH OF RYBINSK RESERVOIR

Wind waves analysis has been carried out in the central part of Rybinsk reservoir, vertical turbulent change has also been estimated. Dynamics of surface quasi-homogeneous water layer has been investigated in the years of different

water content and wind activity. Dynamics of mixed layer was proved to be governed by wind force. With wind speed being over than 10 m/s, mixed layer depth is equal to whole water body depth (that is from the water surface up to the reservoir

bottom). Considerable contribution in temporal temperature variability in thermocline may be produced by internal waves.

Key words: wind waves, mixed layer depth, thermal structure