

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК [556.555+551.509]:001.891.57

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛО-МАССООБМЕНА ВОДОЕМА С АТМОСФЕРОЙ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА МЕЛКОВОДИЙ НА ПРИМЕРЕ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА¹

© 2011 г. Г. Н. Панин*, М. Г. Гречушникова**, В. В. Пуклаков**

*Институт водных проблем Российской академии наук
119333 Москва, ул. Губкина, 3

**Московский государственный университет
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 01.12.2010 г.

В основе работы — боксовая модель тепло-массообмена с включением блока расчета скрытого потока тепла, дополненного параметризацией тепло-массообмена мелководной акватории с атмосферой. Приведены результаты расчета испарения с акватории Иваньковского водохранилища с учетом интенсификации испарения на мелководьях. Показаны различия интенсивности потоков скрытого тепла с мелководной и глубоководной зоны водоема в зависимости от погодных условий и уровня воды; оценено увеличение объема испарившейся воды при учете эффекта “мелкой” воды.

Ключевые слова: теплообмен, мелководья, моделирование, тепловой баланс.

При моделировании взаимодействия водоема с атмосферой ключевое значение имеет расчет потоков явного и скрытого тепла в приводном слое. Основой для моделирования этих потоков, так же как и потоков, формируемых над сушей, служит теория подобия Мони́на–Обухова [8]. Водная поверхность очень динамична: на ее поверхности возникают и разрушаются волны, что приводит к изменчивости коэффициента шероховатости и, соответственно, изменчивости потоков тепла и импульса. Для учета эффекта волнения на турбулентные потоки Чарноком была предложена известная формула, задающая зависимость коэффициента шероховатости от скорости трения в приводном слое воздуха. В дальнейшем были предложены ее обобщения [7]. Однако эти формулы не учитывают зависимости волнения от локальной глубины озера: при меньших глубинах гребни волн становятся более крутыми, что должно приводить к увеличению шероховатости и турбулентных потоков.

Заметим, что в современных моделях тепло-массообмена между водоемами и атмосферой не учитываются особенности мелкомасштабного взаимодействия мелководий с атмосферой. Волны в мелководных акваториях более крутые, чем в открытых и глубоководных частях морей, и обрушаются при более низких скоростях ветра, что приводит к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и, соответственно, к более интенсивному турбулентному обмену импульсом,

теплом и влагой. В тех моделях, где не учитывается увеличение (в аэродинамическом смысле) шероховатости водной поверхности, можно ожидать заниженные значения турбулентного обмена импульсом, теплом и влагой. Заметим также, что на сегодняшний день вообще нет какого-либо надежного метода определения испарения и теплообмена мелководных озер и прибрежной зоны морей.

Цель данной работы — оценка взаимодействия водной массы Иваньковского водохранилища с атмосферой с помощью модели тепло-массообмена долинного водохранилища, разработанной на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ [2, 10] и дополненной моделью взаимодействия мелководий с атмосферой [9].

РАЗВИТИЕ БОКСОВОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛО-МАССООБМЕНА ВОДОЕМА С АТМОСФЕРОЙ

Параметризация испарения для “мелкой” воды, предложенная Г.Н. Паниным и др. [9], сводится к тому, что интенсивность испарения, теплообмена и энергообмена мелководий рассчитывается в виде

$$\begin{aligned} U_*^{SW} &= U_* + U_* k_U^{SW} \frac{h^{SW}}{H} \approx U_* (1 + 1.6 h^{SW}/H), \\ Q_T^{SW} &= Q_T + Q_T k_T^{SW} \frac{h^{SW}}{H} \approx Q_T (1 + 2 h^{SW}/H), \\ E^{SW} &= E + E k_E^{SW} \frac{h^{SW}}{H} \approx E (1 + 2 h^{SW}/H), \end{aligned} \quad (1)$$

¹ Работа выполнения в рамках Госконтракта П1394.

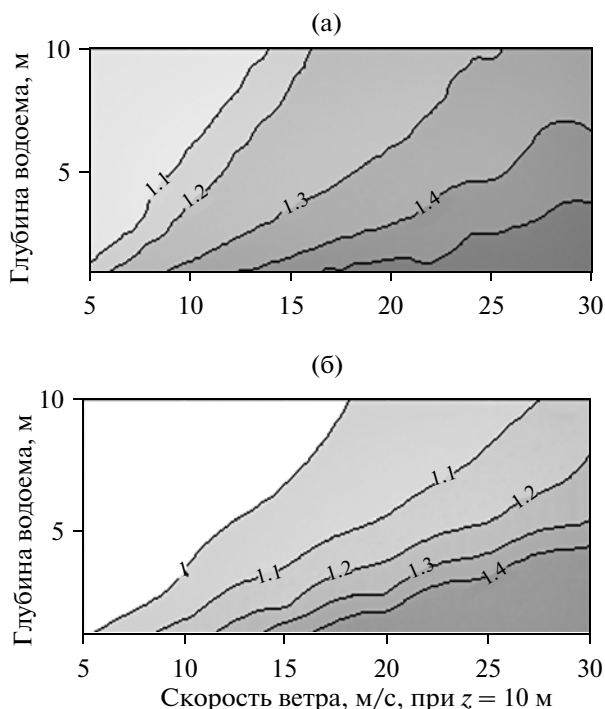


Рис. 1. Коэффициент интенсификации испарения и теплообмена водной поверхности с атмосферой (а) и динамической скорости ветра (б) при различной скорости ветра на высоте $z = 10$ м и разной глубине водоема.

где h — высота волны, H — глубина, E и Q_T — потоки скрытого и явного тепла соответственно на глубокой воде, U_* — динамическая скорость ветра, $k_T^{sw} \approx k_E^{sw} \approx 2.0$, $k_U^{sw} \approx 1.6$ — эмпирические коэффициенты, индекс “sw” означает “мелководье”.

Величина интенсификации энерго-массообмена мелководных акваторий с атмосферой, полученная на основе эмпирических формул (1) при различных скоростях ветра, проиллюстрирована на рис. 1.

Важно, что модель тепло-влагообмена мелководных и прибрежных акваторий с атмосферой [9] позволяет уточнять значения характеристик взаимодействия водоема с атмосферой на основе стандартной гидрометеорологической информации. Для создания модели и ее проверки использовались данные как прямых измерений турбулентных потоков импульса, тепла и влаги, так и характеристик поверхностных волн. Данные были получены как на глубоководных и мелководных акваториях открытого водоема, так и в его прибрежных зонах. Этот новый способ расчета позволяет оценить непосредственное влияние глубины водоема на процессы энерго-массообмена как открытого водоема, так

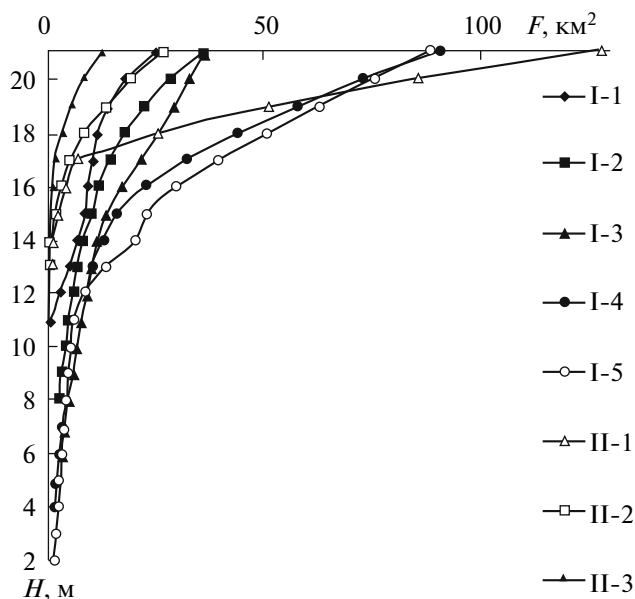


Рис. 2. Батиграфические кривые расчетных отсеков Иваньковского водохранилища в соответствии с расчетной схемой. Здесь и на рис. 4 I-1–I-5, II-1–II-3 — номера расчетных отсеков.

и в его прибрежных зонах. Следует также заметить, что соответствующая поправка на турбулентные потоки и температуру поверхности водоема оказалась заметной на временах порядка месяца [11].

Полученные результаты позволили усовершенствовать модель тепло-массообмена путем внедрения блока расчета потоков скрытого и явного тепла на мелководьях. Эта схема позволяет проводить расчет с переменным шагом по времени (суточным или часовым) и представляется более перспективной, чем метод расчета испарения, предложенный в [2]. Тестовые расчеты произведены на примере Иваньковского водохранилища, обладающего обширными мелководьями в верховьях. Для моделирования выбраны три года, различающиеся по водности притока и погодным условиям: 1973, 1981 и 1984 гг. Для тестовых расчетов нового блока моделирования тепло-массообмена водохранилища с атмосферой с учетом мелководий выбрано именно Иваньковское водохранилище, поскольку данные о составляющих его водного баланса доступны в справочной литературе, а морфометрические особенности таковы, что в соответствии с модельной схемой (рис. 2) в расчетных отсеках I-4, I-5 и в особенности в II-1 площади мелководий особенно велики.

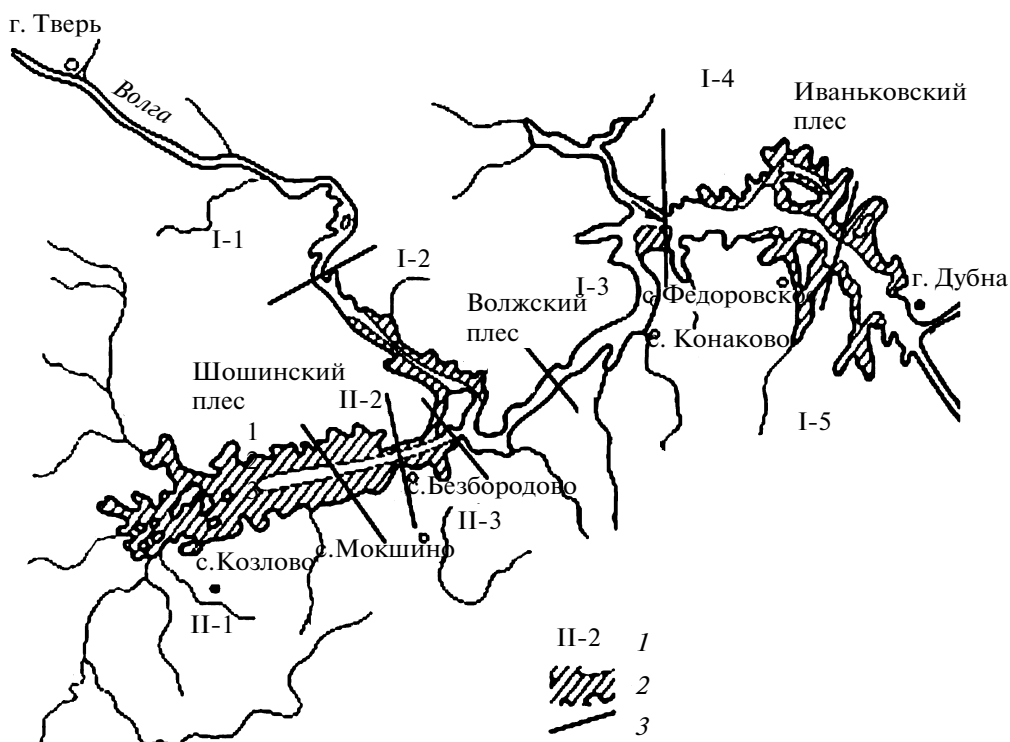


Рис. 3. Мелководья Иваньковского водохранилища по [4]. 1 – номера расчетных отсеков, 2 – мелководья, 3 – границы расчетных отсеков.

СХЕМАТИЗАЦИЯ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА С АТМОСФЕРОЙ ДЛЯ СРЕДНЕГО И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОДНОСТИ

По данным [5] площадь мелководий Иваньковского водохранилища составляет 156 км² (по проекту: глубиной до 1 м – 97 км², глубиной от 1 до 2 м – 59 км²), площадь при УМО – 83.5 км², площадь акватории 327 км²; площадь водосбора 40570 км². По морфологии водохранилище делится на 3 плеса: Иваньковский, Волжский, Шошинский. Основные притоки водохранилища – реки Волга, Тверца, Лама, Шоша (рис. 3). В горизонтальном направлении водоем разделен на две лопасти и восемь расчетных отсеков (рис. 4). Основная лопасть распространяется вверх по р. Волге от плотины Иваньковского гидроузла до г. Твери. Она состоит из пяти отсеков: отсек I-1 г. Тверь–с. Городня; отсек I-2 с. Городня–д. Плоски; отсек I-3 д. Плоски–д. Сурсово; отсек I-4 д. Сурсово–о. Клинцы; отсек I-5 о. Клинцы–плотина ГЭС. Вторая лопасть распространяется вверх по р. Шоше (Шошинский плес) и состоит из трех отсеков: отсек II-1 с. Тургиново – дамба ж/д моста; отсек II-2 дамба ж/д моста–дамба

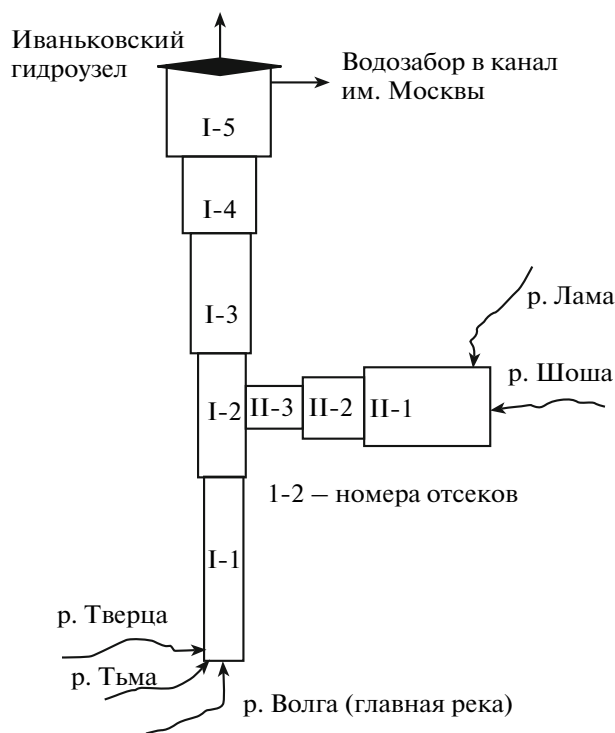


Рис. 4. Схема расчетных отсеков Иваньковского водохранилища.

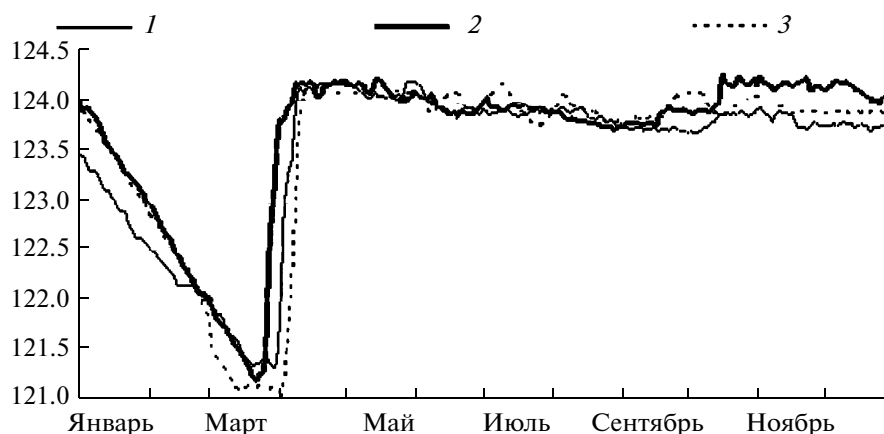


Рис. 5. Колебания уровня воды, м абс., Иваньковского водохранилища в 1973 1, 1981 2 и 1984 3 гг.

автомобильного моста; отсек П-3 дамба автомобильного моста—устье р. Шоши.

Площадь отсеков на расчетных горизонтах задавалась по данным, приведенным в приложении 1 монографии [1], и данным, полученным путем планиметрирования лоцманской карты водохранилища [6] с масштабом 1 : 25000.

Текущие значения гидрометеорологических параметров на каждые расчетные сутки были получены из следующих источников: расход притока воды в водохранилище по главной реке принимается равным расходу р. Волги в створе водомерного поста г. Старица (по данным гидрологических ежегодников); температура воды притоков — по среднедекадным данным с поправкой, отражающей внутридекадные колебания температуры воды. Величина этой поправки для каждого расчетных суток принималась равной отклонению суточной температуры воздуха от ее среднедекадного значения, умноженному на поправочный коэффициент, отражающий большую инерционность в изменениях температуры воды по сравнению с температурой воздуха. Суточные значения атмосферных осадков, скорости ветра, температуры воздуха, атмосферного давления, упругости водяного пара задавались по данным метеостанции г. Твери по [12]; общая и нижняя облачность — по данным срочных наблюдений за облачностью на метеостанции Красновидово; расход воды из водохранилища через водосбросные сооружения плотины — по данным Иваньковской ГЭС; расход воды боковых притоков — по данным водомерных постов на притоках, приведенным в гидрологических ежегодниках; минерализация воды притоков водохранилища рассчитана по эмпирическим зависимостям, полученным по данным многолетних наблюдений, опубликованным в гидрологических ежегодниках за 1955–1975 гг.

Оценка взаимодействия Иваньковского водохранилища с атмосферой выполнялась как для средних по водности условий, так и для экстремаль-

ных случаев. В качестве маловодного выбран 1973 г. Среднегодовой расход р. Волги в г. Старице за этот год был равен $97.4 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет 62% средне-многолетнего за 1891–1985 гг. ($Q_{\text{ср}} = 156 \text{ м}^3/\text{с}$). На основных боковых притоках водохранилища: р. Тверца—с. Медное, р. Шоша—с. Микулино, р. Лама—с. Егорье среднегодовые расходы воды равнялись 42.9, 4.33 (57% нормы) и $6.21 \text{ м}^3/\text{с}$ (79%) соответственно. Среднегодовой сброс в нижний бьеф водохранилища составил $122 \text{ м}^3/\text{с}$ (52% среднего за 1937–1985 гг.).

В качестве многоводного взят 1981 г. Среднегодовой расход р. Волги в г. Старице в этот год был равен $189 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет 121% среднемноголетнего (р. Тверца—с. Медное, р. Шоша—с. Микулино — 45, р. Лама—с. Егорье — 130% нормы, среднегодовой сброс — 129% среднего).

В качестве близкого к среднему по водности году взят 1984 г. Среднегодовой расход р. Волги в г. Старице в этот год был равен $128.4 \text{ м}^3/\text{с}$ — 82% среднемноголетнего (р. Тверца—с. Медное — 113, р. Шоша—с. Микулино — 71, р. Лама—с. Егорье — 88.6% нормы, среднегодовой сброс — 84.8% среднемноголетних величин).

Несмотря на различную водность притоков водохранилища в выбранные годы, изменение уровня воды в водохранилище за период открытой воды (когда акватория полностью свободна ото льда) различается незначительно (рис. 5): от 123.7 м абс. 06.10.1973 до 124.18 01.05.1981. Расчет испарения, последующий анализ и сравнение полученных данных, осредненных по месяцам, проводились для периода открытой воды, т.е. с мая по октябрь. В начале апреля и в ноябре водохранилище может быть частично покрыто льдом, что подразумевает другую методику расчета, которую авторы в данной работе не рассматривают.

По данным об изменении температуры воздуха (рис. 6) наиболее теплым оказался 1981 г. с суточ-

ным максимумом температуры воздуха до 25.9°C. В летне-весенний период 1973 и 1984 гг. имеют схожие условия: среднее значение температуры воздуха с мая по август составило 15.9 и 15.0°C соответственно, а наибольшее и наименьшее – 23.1 и 22.2, 5.7 и 5.3°C соответственно. В 1973 г. осень выдалась наиболее прохладной (до -3.4°C 24.10.1973) даже по сравнению со среднемноголетними значениями (табл. 1).

Для каждого из выбранных лет проведены три варианта расчета: по версии модели ТМО с использованием формулы ГГИ для расчета среднесуточной величины испарения, по версии модели с использованием теории подобия Монина–Обухова, предыдущий вариант с включением блока испарения для участков “мелкой” воды [9]. В третьей версии значения потоков явного и скрытого тепла рассчитываются для мелководной и глубоководной зон, а затем определяются их средневзвешенные значения.

Сравнение результатов всех вариантов расчета со значениями испарения, опубликованными в гидрологических ежегодниках, приведено в табл. 2. За выбранные периоды рассчитанные по третьему варианту значения объема испарившейся воды составляют от 66 до 157% значений, приведенных в ежегоднике: от 98 до 123% в 1973 г., от 109 до 157% в наиболее теплое 1981 г., от 66 до 106% в 1984 г., отличающемся прохладной погодой в летние месяцы. Учет интенсификации испарения на мелководьях увеличивает расчетные значения объема испарившейся воды в среднем с мая по октябрь на 1.9 (от 1.4 до 2.9), 1.7 (от 0.8 до 2.7) и 1.0 (от 0.8 до 1.3) млн. м³ в 1973, 1981 и 1984 гг. соответственно. Использование новой расчетной схемы дает увеличение расчетных значений объема испарившейся воды за период с мая по октябрь в среднем на 3.9, 3.4 и 1.6 млн. м³ для 1973, 1981 и 1984 гг. соответственно по сравнению с

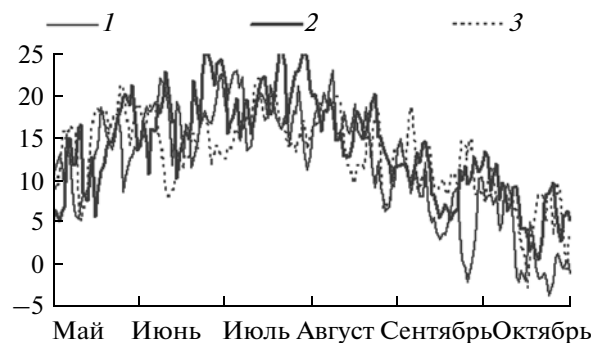


Рис. 6. Изменение среднесуточной температуры воздуха, °С, на метеостанции г. Тверь в 1973 1, 1981 2 и 1984 3 гг.

результатами первого варианта расчета с использованием формулы ГГИ.

Для того чтобы проверить, целесообразно ли использовать новую расчетную схему, проведен расчет значений невязки водного баланса (ВБ) для каждого месяца из выбранных периодов при замене значений слоя испарившейся воды, приведенных в ежегодниках, на значения, полученные третьим способом расчета (табл. 3).

Для 1973 и 1981 гг. использование результатов расчета испарения новой версии модели оказались вполне удачными. В 1973 г. незначительное увеличение невязки ВБ (на 1.9 млн. м³) отмечено только в мае, для остальных месяцев сокращение невязки составило от 3 до 8.9 млн. м³ (6.8 и 63.6% соответственно). В 1981 г. увеличение невязки ВБ на 15% (4.5 млн. м³) отмечается только в августе, в остальные же месяцы использование новой расчетной схемы слоя испарившейся воды сокращает невязки на величину от 2.1 до 15.6 млн. м³ (от 8.8 до 81%). В 1984 г. неудачный результат отмечается только в мае (невязка хоть и увеличилась вдвое, но по абсолют-

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры воздуха и скорости ветра

| Год | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|-------------------------|------|------|------|--------|----------|---------|
| Температура воздуха, °С | | | | | | |
| 1973 | 12.3 | 17.8 | 18.3 | 15.2 | 6.8 | 2.6 |
| 1981 | 13.0 | 18.7 | 20.4 | 16.0 | 10.2 | 7.0 |
| 1984 | 15.1 | 14.1 | 16.5 | 14.3 | 11.3 | 6.1 |
| Средняя многолетняя | 11.7 | 15.4 | 17.8 | 15.6 | 10.4 | 4.0 |
| Скорость ветра, м/с | | | | | | |
| 1973 | 3.4 | 2.6 | 3.2 | 2.8 | 3.1 | 3.5 |
| 1981 | 3.1 | 3.5 | 2.9 | 2.9 | 3.0 | 4.0 |
| 1984 | 3.8 | 3.2 | 3.6 | 3.3 | 2.5 | 2.6 |
| Средняя многолетняя | 2.9 | 2.7 | 2.4 | 2.5 | 3.0 | 3.0 |

Таблица 2. Среднемесячные значения объема испарившейся воды. 1 – по данным расчета модели ТМО, 2 – по усовершенствованной версии модели (теория подобия Монина–Обухова) без учета эффекта влияния мелководий, 3 – то же с коррекцией “мелкой” воды; в числителе – млн. м³, в знаменателе – доля рассчитанных объемов испарения по отношению к аналогичным данным из гидрологических ежегодников

| Вариант расчета | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1973 г. | | | | | | |
| 1 | 20.8/0.80 | 44.1/1.13 | 53.1/1.04 | 35/1.06 | 24.1/1.00 | 15.9/0.99 |
| 2 | 23.9/0.91 | 45.6/1.17 | 56.2/1.10 | 35.8/1.08 | 25.6/1.07 | 18.1/1.13 |
| 3 | 25.5/1.06 | 47.9/1.23 | 59.1/1.16 | 37.2/1.13 | 27.0/1.13 | 19.2/1.20 |
| 1981 г. | | | | | | |
| 1 | 22.4/0.93 | 45.1/1.33 | 62.2/1.45 | 35.3/1.04 | 20.7/1.13 | 16.5/0.97 |
| 2 | 24.5/1.02 | 47.3/1.39 | 64.6/1.50 | 37.1/1.09 | 20.7/1.13 | 18.4/1.08 |
| 3 | 26.1/1.09 | 49.6/1.46 | 67.3/1.57 | 38.4/1.13 | 21.5/1.17 | 19.9/1.17 |
| 1984 г. | | | | | | |
| 1 | 20.1/0.59 | 36.1/0.99 | 35.0/0.86 | 34.0/0.91 | 22.1/0.79 | 17.5/0.84 |
| 2 | 21.4/0.63 | 37.3/1.06 | 34.8/0.88 | 34.7/0.95 | 22.0/0.83 | 19.5/1.00 |
| 3 | 22.4/0.66 | 38.6/1.06 | 35.6/0.88 | 35.7/0.95 | 23.1/0.83 | 20.8/1.00 |

Таблица 3. Использование результатов расчета модели ТМО с коррекцией “мелкой” воды для уточнения водного баланса Иваньковского водохранилища. По данным гидрологических ежегодников: 1 – аккумуляция в чаше водохранилища, млн. м³; 2 – $\Sigma\Pi - \Sigma P$; 3 – невязка N водного баланса, млн. м³; 4 – сумма приходных и расходных компонентов; 5 – невязка водного баланса, млн. м³, при подстановке рассчитанных значений объема испарившейся воды с учетом влияния мелководий в ΣP .

| Показатель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|------------|-------|-------|-------|--------|----------|---------|
| 1973 г. | | | | | | |
| 1 | –4 | –94 | –17 | –44 | –13 | 74 |
| 2 | 22 | –80 | 36 | –14 | 31 | 100 |
| 3 | 26 | 14 | 53 | 30 | 44 | 26 |
| 4 | 22.5 | –88.9 | 27.9 | –18.2 | 28.0 | 96.8 |
| 5 | 26.5 | 5.1 | 44.9 | 25.8 | 41.0 | 22.8 |
| 1981 г. | | | | | | |
| 1 | –44 | –32 | –24 | –45 | 35 | 122 |
| 2 | –20 | –2 | 6 | –75 | 88 | 150 |
| 3 | 24 | 30 | 30 | –30 | 53 | 28 |
| 4 | –22.1 | –17.6 | –18.3 | –79.5 | 84.8 | 147.1 |
| 5 | 21.9 | 14.4 | 5.7 | –34.5 | 49.8 | 25.1 |
| 1984 г. | | | | | | |
| 1 | –33 | –22 | –38 | –35 | 102 | –15 |
| 2 | –23 | 23 | 11 | 15 | 69 | –35 |
| 3 | 10 | 45 | 49 | 50 | –33 | –20 |
| 4 | –11.3 | 20.9 | 16.0 | 16.8 | 73.9 | –35.0 |
| 5 | 21.7 | 42.9 | 54.0 | 51.8 | –28.1 | –20.0 |

ной величине меньше, чем в летние месяцы этого года), в июле–августе невязка увеличилась на 10.2 и 3.6%, а в июне и сентябре сократилась на 4.7 и 14.9% соответственно.

В целом можно признать, что опыт использования новой расчетной схемы привел к сокращению невязки ВБ в период открытой воды. Наибольшее ее сокращение приходится на самый жаркий месяц

Таблица 4. Среднемесячные значения потоков скрытого тепла и площади мелководной и глубоководной зоны. 1 – E^{SW} ; 2 – E , Вт/м²; 3 – $(E^{SW} - E)/E_{cp}$, %; 4 – F^{SW} км²/‰ площади акватории; 5 – F , км²/‰ площади акватории; 6 – уровень воды, м абс.

| Показатель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1973 г. | | | | | | |
| 1 | 69.1 | 108.8 | 125.7 | 85.0 | 53.7 | 19.4 |
| 2 | 62.2 | 100.0 | 113.0 | 78.4 | 48.9 | 17.6 |
| 3 | 11 | 8.5 | 11 | 7.9 | 9.6 | 9.7 |
| 4 | 80/23.2 | 98.1/29.2 | 120.3/36.5 | 115.8/35.3 | 104.6/33.0 | 122.6/37.9 |
| 5 | 367.8/76.8 | 238.4/70.8 | 209.4/63.5 | 212/64.7 | 212.5/67 | 201.0/62.1 |
| 6 | 123.8 | 123.73 | 123.9 | 123.79 | 123.57 | 123.67 |
| 1981 г. | | | | | | |
| 1 | 103.6 | 151.6 | 186.44 | 125.9 | 68.0 | 66.9 |
| 2 | 93.7 | 136.3 | 170.1 | 115.8 | 62.1 | 59.2 |
| 3 | 10 | 11 | 9.4 | 8.5 | 9.2 | 12.5 |
| 4 | 86.9/24.8 | 124.6/38.3 | 119.3/35.7 | 111.9/34.7 | 116.5/35.9 | 111.3/32.2 |
| 5 | 263.2/75.2 | 209.7/62.7 | 214.5/64.2 | 210.6/65.3 | 208.2/64.1 | 234.5/67.8 |
| 6 | 123.86 | 123.86 | 123.92 | 123.67 | 123.63 | 123.74 |
| 1984 г. | | | | | | |
| 1 | 101.5 | 111.6 | 107.8 | 106.7 | 73.6 | 63.1 |
| 2 | 93.0 | 107.5 | 103.5 | 101.7 | 67.7 | 56.3 |
| 3 | 8.7 | 3.7 | 4.1 | 5.1 | 8.4 | 11.5 |
| 4 | 63.9/18.3 | 79.1/23.5 | 79.8/23.8 | 93.1/28.2 | 100.6/30.7 | 111.5/33.2 |
| 5 | 286.1/81.7 | 257.8/76.5 | 254.9/76.2 | 236.6/71.8 | 227.7/69.3 | 224.9/66.9 |
| 6 | 124.08 | 123.93 | 123.91 | 123.86 | 123.85 | 123.93 |

теплого периода 1981 г. В среднем за расчетный период невязка ВВ увеличивается на 3.6 млн. м³ в 1984 г. и уменьшается на 4.5 и 8.8 млн. м³ в 1973 и 1981 гг.

Различия в величине теплопотерь на испарение с зоны “мелкой” E^{SW} и “глубокой” E воды по данным расчета модели в среднем за месяц приведены в табл. 4. Наибольшие значения интенсивности потерь тепла на испарение на мелководье характерны для теплого июля 1981 г. и достигают 186.4 Вт/м² в среднем за месяц. Соотношение площадей, занятых зонами “мелкой” и “глубокой” воды, выделяемых по методике [9], зависит от положения уровня воды и скорости ветра. Доля площади мелководной зоны в среднем за месяц изменяется от 18.3% площади акватории в мае 1984 г. при наибольшем среднемесячном уровне воды 124.08 м абс., превышающем НПУ, до 37.9% в сентябре 1973 г. с относительно низким значением среднемесячного уровня воды 123.67 м абс. Небольшая разница между E^{SW} и E в 1984 г. обусловлена тем, в 1984 г. скорость ветра была сравнительно низкой (только в течение 4 сут она превыша-

ла 5 м/с и ни разу не превышала 7 м/с). В 1973 и 1981 гг. в течение 1 сут скорость ветра превышала 7 м/с и 11 и 12 сут соответственно превышала 5 м/с.

Для оценки роли ветрового воздействия на соотношение площадей мелководной и глубоководной зон был проведен численный эксперимент. Среднесуточные данные о скорости ветра заменялись в исходном файле значениями 3, 5, 7, 10 и 15 м/с. Экспериментальный расчет проводился для одного месяца, а именно – мая 1973 г., в течение которого уровень воды изменялся от 124.02 до 124.20 (в среднем 124.09) м абс., что соответствует форситованному подпорному уровню. Изменение соотношения площадей мелководной и глубоководной зон несомненно зависит не только от скорости ветра, но и от уровня воды в водоеме, но в случае Ивановского водохранилища этот фактор незначителен, так как за период открытой воды уровень поддерживается близким к НПУ и его колебания не превышают 55 см за выбранные расчетные годы.

Численные эксперименты показали, что наибольшее изменение соотношения площадей мелко-

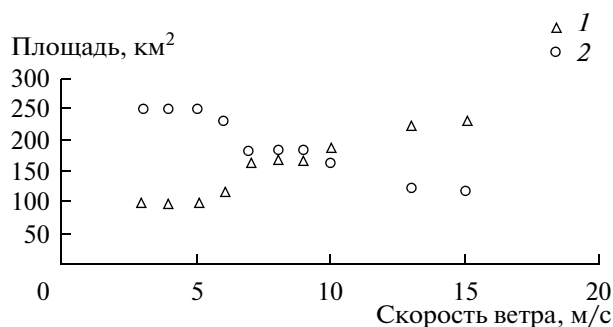


Рис. 7. Изменение площадей мелководной и глубоководной зон в зависимости от увеличения скорости ветра (результаты численного эксперимента). 1, 2 – площадь мелководий и глубоководий соответственно.

водной и глубоководной зон приходится на интервал 5–7 м/с (рис. 7). При увеличении скорости ветра до 5 м/с зона мелководий занимает 28% площади водоема, при увеличении экспериментальной скорости ветра до 7 м/с она возрастает до 55%. При дальнейшем увеличении ветрового воздействия площадь мелководий теоретически продолжит увеличиваться (до 66% при скорости ветра 15 м/с), однако подобные порывы ветра весьма редки и непродолжительны в пределах бассейна рассматриваемого объекта.

Экспериментальные среднемесячные значения потока тепла, затрачиваемого на испарение, при увеличении скорости ветра до 5 и 7 м/с изменяются следующим образом: с увеличением скорости ветра затраты тепла на испарение с мелководий увеличиваются от 144 до 170 Вт/м². При этом слой испарившейся за месяц воды увеличивается на 50 мм, т.е. прирост слоя испарения составляет более 20% с увеличением скорости ветра в данном интервале.

Наименьшие различия в интенсивности затрат тепла на испарение с “мелкой” и “глубокой” воды характерны для относительно прохладного 1984 г., и их доля в величине средневзвешенного потока скрытого тепла в летний период в июле не превышает 4.1%, а в относительно теплом октябре составляет до 11.5%. В 1973 и 1981 гг. различия в интенсивности затрат тепла на испарение с “мелкой” и “глубокой” воды по отношению к величине средневзвешенного потока скрытого тепла составляют от 8.5 до 11% и от 8.5 до 12.5% соответственно и следуют изменениям среднемесячных значений скорости ветра.

ВЫВОДЫ

Можно констатировать, что приведенные результаты свидетельствуют о существенном упущении в исследовании природы взаимодействия водоема с атмосферой. Известно, что волны в мелководных акваториях более крутые, чем в открытых и глубоководных частях водоемов, и раньше (при бо-

лее низких скоростях ветра) обрушаются [3]. Все это приводит к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и, соответственно, к более интенсивному турбулентному обмену импульсом, теплом и влагой. Показано, что пока нет какого-либо надежного метода определения испарения и теплообмена мелководных озер и прибрежных зон морей и учет эффекта мелкой воды дает значимые результаты [9]. Даже для низких скоростей ветра эффект увеличения потоков для мелких озер (на примере экспериментов LITFASS-98 и 2003) достигает значений 10–20% [9], которые выше, чем различия между рассчитанными и измеренными потоками. Это свидетельствует о том, что для озер, для которых доступен стандартный набор данных о скорости ветра, воздушной и водной температуре, воздушной влажности и глубине, значения испарения и теплообмена с атмосферой вполне могут быть скорректированы путем учета мелководного эффекта.

В настоящей работе учет мелководного эффекта в расчете испарения реализован для Ивановского водохранилища. Полученные результаты показали, что различия интенсивности потоков скрытого тепла с мелководной и глубоководной зон этого водоема определяются как погодными условиями, так и положением уровня воды, несмотря на относительно небольшие его колебания в течение безледного периода, и изменяются в пределах от 3.7 до 12.5% по отношению к величине средневзвешенного потока скрытого тепла в зависимости от сезона и характерных метеорологических условий.

Следует также заметить, что предлагаемый метод расчета испарения на мелководьях включает только эффект, связанный с развитием волнения, и не рассматривает возможное изменение испарения, связанное с транспирацией водной растительности, которая обильно покрывает мелководные участки воды некоторых внутренних водоемов. В частности для Ивановского водохранилища степень зарастания всей акватории составляет 26, а мелководий 54.3% [4]. Высшая водная растительность гасит ветровые волны, формирующиеся на акватории, поэтому перспективой развития блока тепло-массообмена можно считать разработку учета биологического фактора интенсификации испарения в комплексе с развитием экологического блока модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 292 с.
2. Гречушников М.Г. Адаптация модели ТМО к расчету внутрисуточного режима температуры воды в стратифицированном водохранилище // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 6. С. 671–680.
3. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Волны в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.

4. Ивановское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны / Под ред. Абакумова В.А. М.: Наука, 2000. 344 с.
5. Кадастр водохранилищ СССР. Л., 1971. Вып. 1. 570 с.
6. Лоцманская карта Ивановского водохранилища от г. Калинина до пристани Большая Волга. М.: Управление канала им. Москвы, 1967. 19 с.
7. *Лыков В.Н.* О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. С. 696–704.
8. *Монин А.С., Обухов А.М.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. № 24 (151). С. 163–187.
9. *Панин Г.Н., Насонов А. Е., Фокен Т.* Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 367–383.
10. *Пуклаков В.В.* Гидрологическая модель водохранилища. Руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.
11. *Степаненко В.М.* Численное моделирование взаимодействия атмосферы с водоемами суши. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2007. 159 с.
12. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov>