



УДК 627. 8; 556. 556. 3

Определение характеристик волнового режима Братского водохранилища

Е. Н. Сутырина (ensut@rambler.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты применения данных реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction / The National Center for Atmospheric Research – аббревиатура Центра исследования окружающей среды и Национального центра атмосферных исследований США) для оценки характеристик волнового режима водоёма на примере Братского водохранилища.

Ключевые слова: волновой режим, Братское водохранилище, данные реанализа NCEP/NCAR.

Введение

Братское водохранилище, созданное подпором плотины Братской ГЭС в Падунском сужении, расположено в юго-западной части Иркутской области и является одним из крупнейших искусственных водоемов в России. Наполнение водохранилища началось в сентябре 1961 г. и закончилось в сентябре 1967 г. Братское водохранилище представляет собой водоем, характеризующийся сложными инженерно-геологическими, гидродинамическими и морфометрическими условиями [12; 18; 19]. В плане значительная часть водохранилища тянется в меридиональном направлении, и только небольшой его участок от с. Заярск до г. Братск имеет широтное направление.

Подпор от плотины Братской ГЭС при НПУ (нормальном подпорном уровне) водохранилища распространяется вверх по Ангаре на 535 км, по ее притоку р. Оке – на 330 км и по р. Ия, являющейся притоком Оки – на 150 км [15]. Общая протяженность береговой линии водохранилища составляет около 6000 км. Берега сильно изрезаны различными по величине реками и глубоко вдающимися заливами.

При появлении больших водных поверхностей на водохранилище интенсифицируются процессы формирования, развития и распространения волн, вызванных ветром. При этом ветровые волны вызывают трансформацию берегов водохранилища. Под воздействием волнения и вследствие повышения уровня грунтовых вод, вызванных наполнением водохранилища, происходит интенсивный размыв берегов, отмечаются значительные оползни береговой полосы в воду. По разным данным этим процессом подвержено от 1200 км [10] до 2100 км [19] береговой полосы. За период эксплуатации водохранилища размыв берегов на отдельных участках составил от 60 до 175 м, а местами берег отступил на 470 м (пос. Артумей) [15].

Отступление береговой линии на десятки и сотни метров в результате размыва берегов приводит к потерям территории. Нестабильность режима эксплуатации водохранилища не способствует затуханию абразионных процессов в береговой зоне, которая по-прежнему находится в стадии становления [10]. И по причине того, что волновые процессы входят в число наиболее существенных факторов протекания абразионных процессов на Братском водохранилище, для составления прогнозов размыва береговой линии необходимо располагать информацией о волновом режиме водоёма.

Методика расчета параметров ветровых волн

Оценка волнового режима производилась для 18 пунктов на берегу Братского водохранилища (рис. 1), по которым в дальнейшем предполагается составить прогноз береговых переформирований.

Ветровые волны — колебательные движения частиц воды, вызываемые энергией ветра при его непосредственном воздействии на поверхность воды, поэтому для оценки параметров ветрового волнения необходимо располагать информацией о характеристиках ветра.

Согласно ВСН 163–83 [2; 4] для оценки характеристик волнового режима рассматриваемого района водохранилища следует использовать данные о повторяемости ветров различных градаций скорости по восьми румбам для каждого месяца безледоставного периода по ближайшей к участку метеостанции, которые приводятся в Справочниках по климату СССР, часть III (ветер) [17].

Однако использованию материалов из Справочника по климату СССР [17] для оценки волнового режима препятствует как отсутствие сведений о повторяемости ветров различных градаций скорости по восьми румбам для близлежащих метеостанций, так и наличие тенденции к многолетней изменчивости характеристик ветра и волнения [3; 11], что позволяет считать материалы указанного справочника устаревшими.

Ввиду сказанного выше в качестве исходных материалов для определения повторяемости ветров различных градаций скорости по восьми румбам были использованы данные архива реанализа NCEP/NCAR [23]. Из указанного архива реанализа были отобраны четырехсрочные данные за весь период эксплуатации водохранилища с 1967 по 2010 гг., содержащие массивы значений зональной и меридиональной компонент вектора скорости ветра, с дискретизацией по времени в 6 ч. Данные находятся в свободном доступе на сайте ESRL (The Earth System Research Laboratory) [22] в формате NetCDF (Network Common Data Form) – двоичном формате файлов, призванном обеспечить хранение и обработку данных в переносимом и самоопределяемом виде и являющимся стандартом для обмена научными данными.

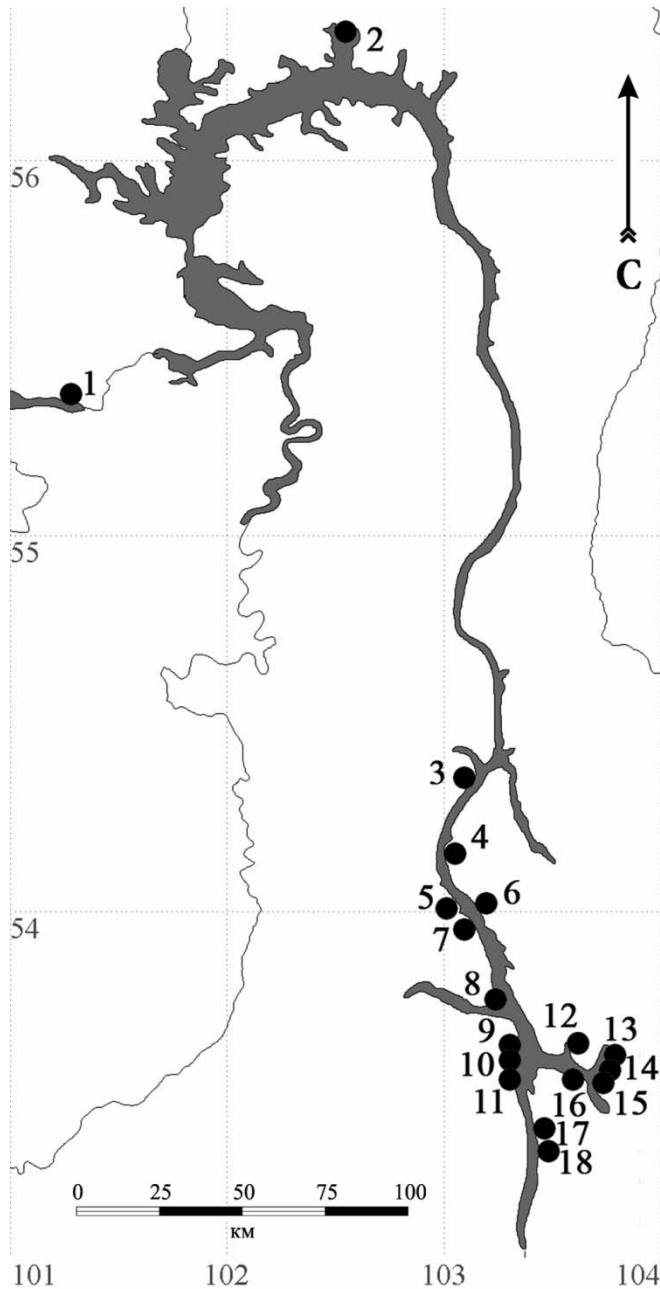


Рис. 1. Схема расположения пунктов на берегу Братского водохранилища, для которых производился расчёт параметров волнения.

Пункты, для которых производился расчёт параметров волнового режима, показаны точками: 1 – Тангуй; 2 – Заярск; 3 – Заславск; 4 – Усть-Уда; 5 – Балаганск;

6 – Игжей; 7 – Коновалово; 8 – Первомайский; 9 – Хадахан; 10 – Быково;
11 – Ангарский; 12 – Унгин; 13 – Приморский; 14 – Бильчир; 15 – Жданово;
16 – Рассвет; 17 – Середкино; 18 – Казачье

Реанализ NCEP/NCAR – это совместный проект Национальных Центров Предсказания Окружающей Среды и Национального Центра Изучения Атмосферы США. Целью проекта NCEP/NCAR по реанализу исторических метеоданных является создание многолетних (с 1948 г. по настоящее время) архивов глобальных метеорологических данных с использованием современной спектральной метеомодели и обширного массива данных мониторинга атмосферы и земной поверхности, включая данные наземных стационарных станций, спутниковых зондирований, самолетов и аэрометеозондов, передвижных сухопутных и океанических метеостанций.

Доступные в настоящее время результаты модельных расчетов климатических параметров достаточно хорошо отображают реальную климатическую картину. В частности, сравнение ветровых данных реанализа NCEP/NCAR с натурными измерениями показало довольно близкое их соответствие [6; 7; 13]. Ветровые данные реанализа NCEP/NCAR являются наиболее обеспеченными и представительными глобальными данными, широко используемыми в современных климатических исследованиях. Помимо этого они дают возможность расчета и оценки характеристик ветрового волнения, являясь при этом основным входным параметром [7; 13; 24]. При этом необходимо учитывать, что данные реанализа предназначены в первую очередь для воспроизведения климатических особенностей гидрометеорологических полей. Часто эта особенность приводит к занижению штормовых ветров, и, как следствие, наибольших высот волн [1; 6; 7; 13]. Потому оправданность их использования при оценке параметров волнения должна подтверждаться сопоставлением с натурными данными.

Еще одним аспектом использования данных реанализа NCEP/NCAR является наличие большого пространственного шага, сопоставимого с характерными размерами водоёма, поэтому для расчета ветрового волнения необходимо иметь значения полей скорости ветра на более частой пространственно-временной сетке, чем исходная. Интерполяция вектора скорости ветра в узлы, соответствующие пунктам, для которых выполнялся расчет параметров ветрового волнения, производился с помощью технологии, специально разработанной для интерполяции метеорологических полей [13; 20].

Для перехода от ветрового режима водохранилищ к волновому режиму были разработаны различные эмпирические формулы, наиболее совершенные из которых применяются и в настоящее время [8; 9; 14; 16]. Величины элементов волн – высоты, длины, периоды и другие – выражают эмпирическими формулами как функциями волнообразующих факторов – скорости ветра, длины его разгона или продолжительности действия. Ввиду сложной и изрезанной конфигурации берегов Братского водохранилища из последних двух факторов наиболее важен учёт длины разгона ветра. Значения длины разгона, а также углы, образованные лучом волны при соответствующем румбе ветра и нормалью к береговой линии, определены по крупномасштабным космофотокартам с использованием сервиса «Google Планета Земля» [21].

Для практических расчетов волнения в каждом рассматриваемом пункте необходимо знать волновые характеристики по трем-четырем наветренным румбам (в зависимости от конфигурации берега). Расчеты элементов волн выполнялись при расчетном уровне воды, равном наибольшему эксплуатационному уровню (то есть в случае водохранилищ при НПУ), используя методы, рекомендуемые для волн на конечной глубине, с учетом особенностей, которые могут возникнуть на водохранилищах при редких колебаниях глубин по линии разгона. Расчет элементов волн, для глубоководной зоны производился для каждой градации скорости по каждому наветренному румбу во всех расчетных пунктах (рис. 1) по эмпирическим формулам, предложенным Л. Ф. Титовым [9]:

$$h = a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0,56} \left(\frac{X}{X_0} \right)^{0,54} \left(1 + \exp \left(a_2 \frac{X}{V} \right) \right), \quad (1)$$

$$\lambda = a_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0,66} \left(\frac{X}{X_0} \right)^{0,64} \left(1 + \exp \left(a_2 \frac{X}{V} \right) \right), \quad (2)$$

где h – высота волны, м; λ – длина волны, м; V – скорость ветра, м/с; X – длина разгона ветра, м; $V_0 = 1$ м/с; $X_0 = 1000$ м; $a_1 = 0,045$ м; $a_2 = -3,50 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $a_3 = 0,310$ м.

Недостатком формул Л. Ф. Титова является невозможность их применения для расчета параметров волн в мелководной зоне.

Оценка элементов волн в прибрежной зоне выполнялась с учетом рефракции волн при подходе к отмелому берегу, диссипации волновой энергии в результате трения о дно, и обрушения ветровых волн на критических глубинах [8; 14; 16].

Основные результаты

В результате проведения данного исследования были определены значения следующих элементов волн: длины, высоты, фазовой скорости распространения волн и период волн в зоне прибрежного мелководья для каждого рассматриваемого пункта на берегу Братского водохранилища.

По волновым характеристикам прибрежной зоны в каждом пункте и сведениям об определенной в ходе работы повторяемости ветра за безледоставный период обеспеченности высот волн по каждому наветренному румбу были определены, относя сезонные повторяемости скоростей ветра к соответствующим высотам волн. Результаты оценки повторяемости высоты волн по наветренным румбам в районе всех рассматриваемых пунктов приведены на рис. 2–4.

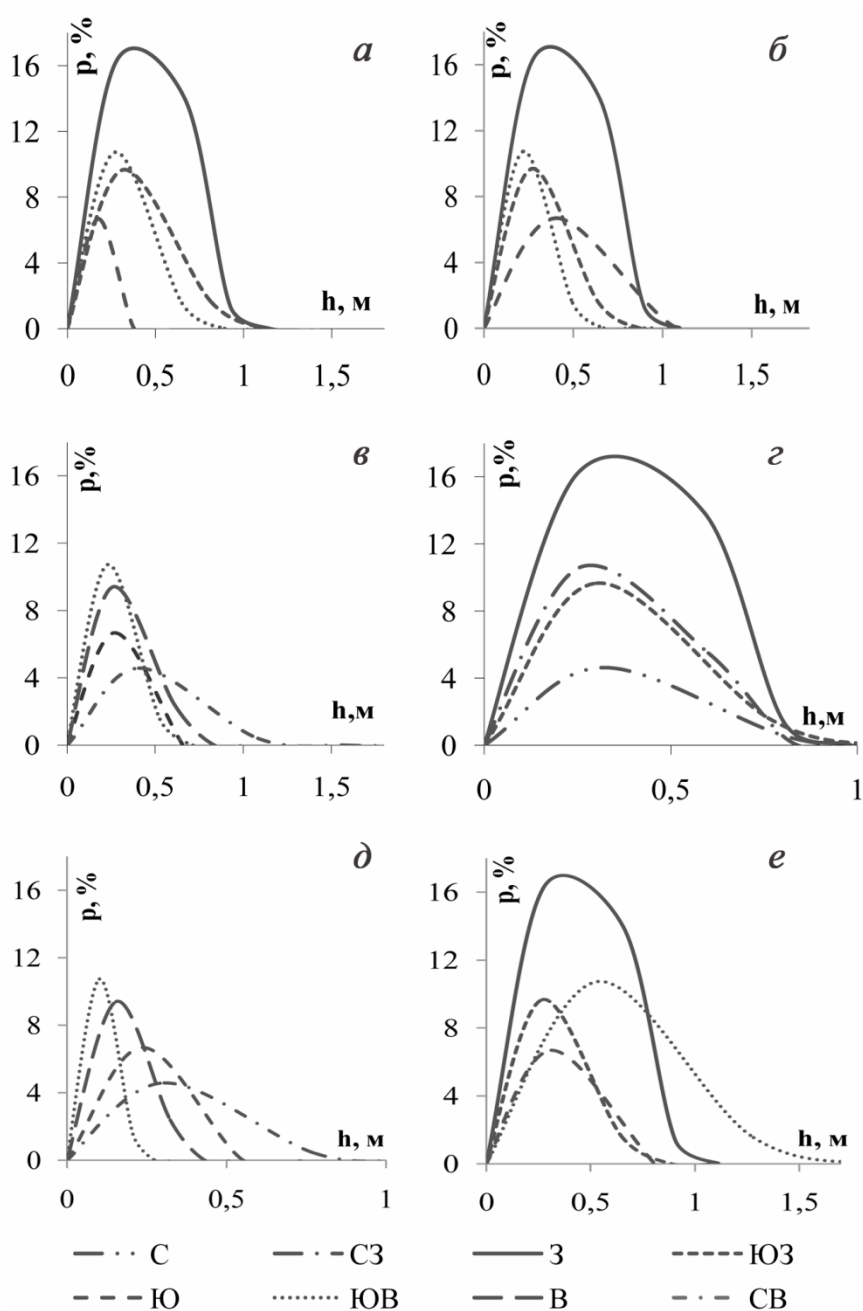


Рис. 2. Кривые повторяемости высоты волн по наветренным румбам в районе пунктов Тангуй (*a*), Заярск (*б*), Заславск (*в*), Усть-Уда (*г*), Балаганск (*д*), Игжей (*е*)

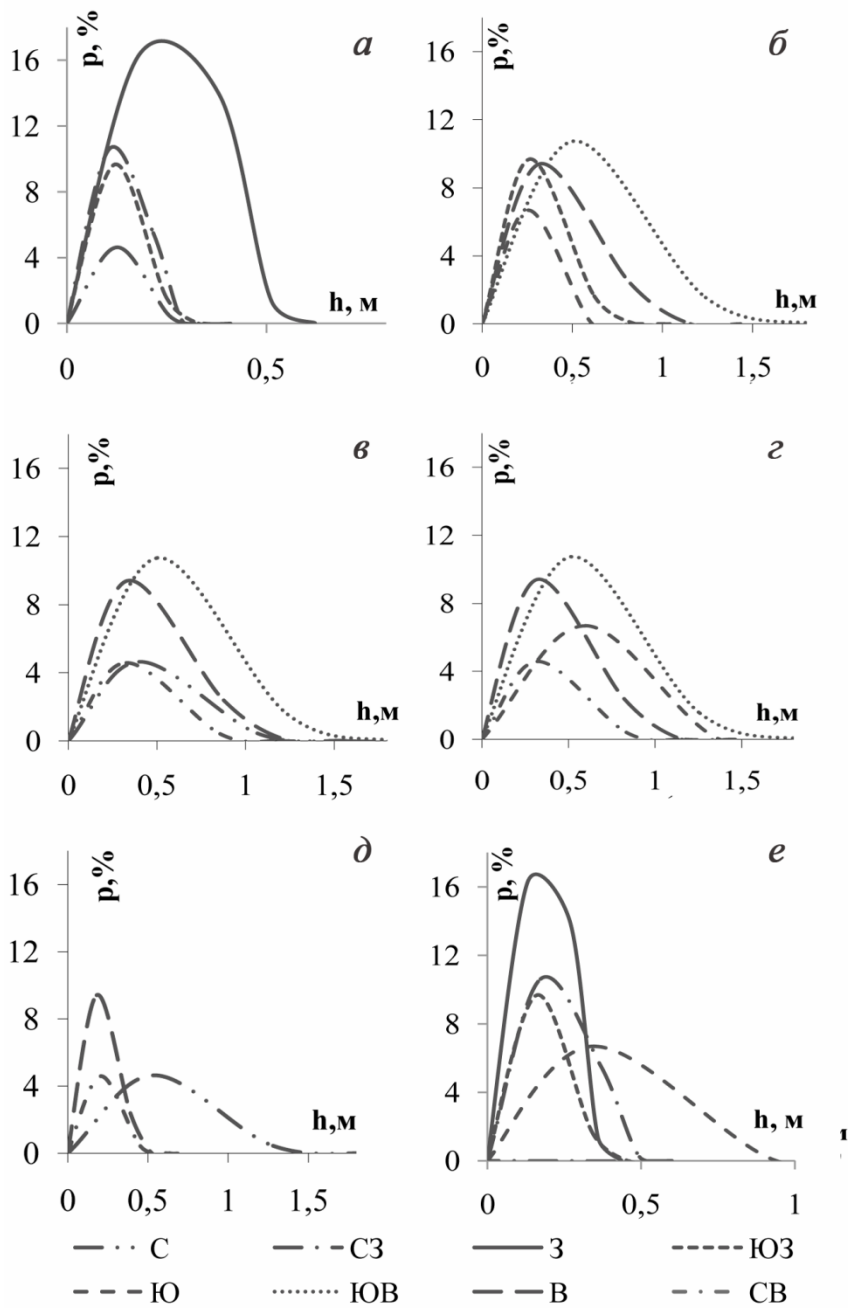


Рис. 3. Кривые повторяемости высоты волн по наветренным румбам в районе пунктов Коновалово (*a*), Первомайский (*б*), Хадахан (*в*), Быково (*г*), Ангарский (*д*), Унгин (*е*)

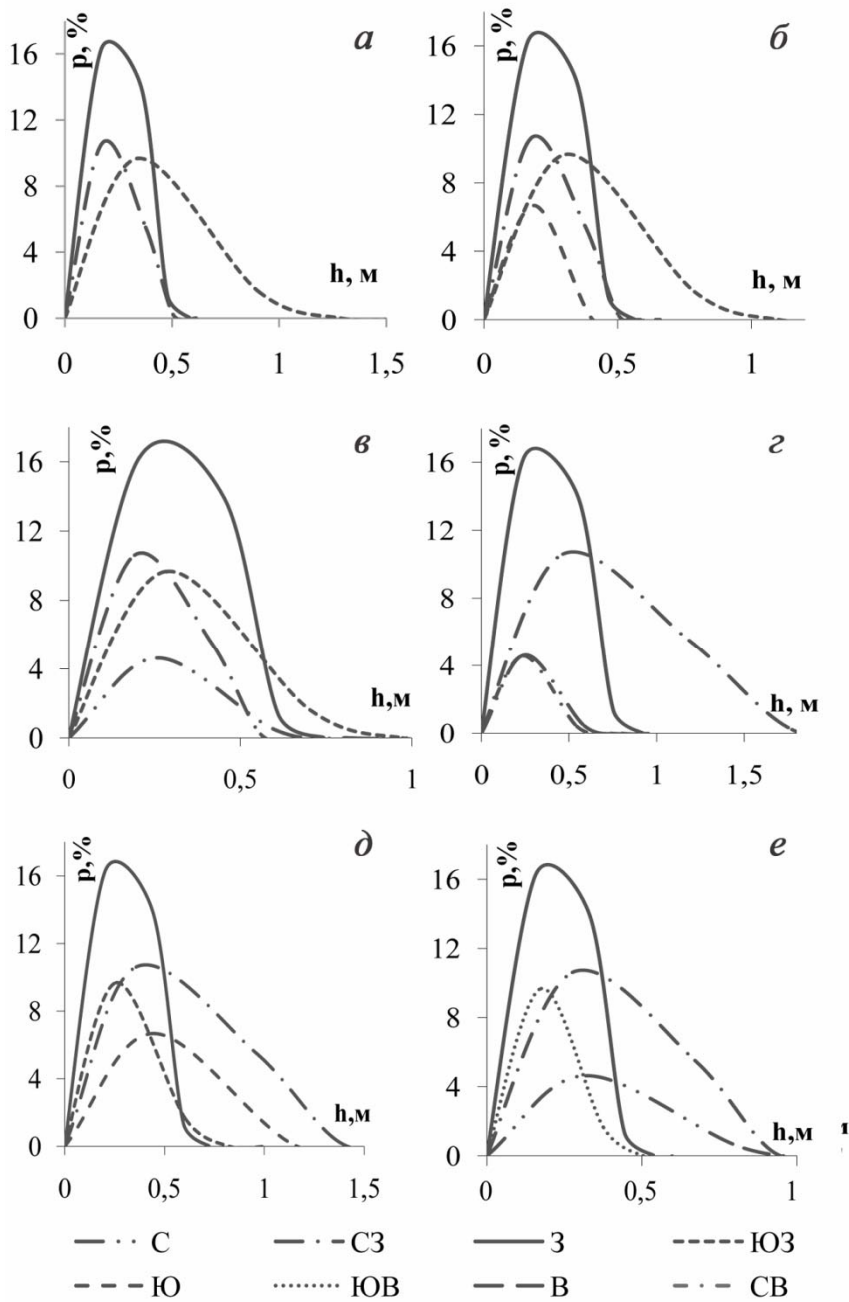


Рис. 4. Кривые повторяемости высоты волн по наветренным румбам в районе пунктов Приморский (*a*), Бильчир (*б*), Жданово (*в*), Рассвет (*г*), Середкино (*д*), Казачье (*е*)

Для оценки применимости предложенной методики были дополнительно определены элементы волн для точек, в которых имеются непродолжительные натурные измерения параметров волнения и которые находятся на некотором удалении от берега и от основных расчетных точек. Значения элементов волн, определенных в ходе исследования, хорошо соотносятся с их наблюдаемыми величинами [5], при этом расхождение рассчитанных и измеренных значений составляет не более 15 %, что позволяет сделать вывод о возможности применения описанного выше подхода для оценки параметров ветровых волн Братского водохранилища.

Кроме расчета элементов волн в ходе исследования по методике, предложенной ВСН163–83 [4], была проведена оценка среднемноголетней за безледоставный период суммарной мощности ветровых волн на единицу протяженности береговой линии. Данная характеристика находит применение непосредственно при расчете разрушения берегов водоемов ветровыми волнами.

Выводы

Проблема оценки параметров ветра и ветрового волнения важна при решении многих хозяйственных задач. Ветер и волнение являются одними из наиболее важных элементов, определяющих безопасность судоходства и береговой инфраструктуры. Помимо этого расчеты элементов ветровых волн выполняются для целей прогнозирования состояния поверхности водоема и для составления его режимно-климатических характеристик. Необходимость расчета параметров волнения объясняется тем, что систематические наблюдения волнения на большинстве водоемов являются малочисленными.

Режиму ветра и волнения Братского водохранилища в прошлом уделялось достаточно много внимания. Однако, несмотря на это, доступный в настоящее время материал не является полным и ограничен либо продолжительностью рассматриваемого периода, либо описанием режима на примере лишь нескольких наиболее показательных станций.

Учитывая проведенный выше анализ, можно заключить, что в свете вероятной многолетней изменчивости режимных характеристик использование массивов данных реанализа с учетом более полных рядов данных позволяет обновить информацию о волновом режиме Братского водохранилища. При этом необходимо отметить, что использованный автором подход позволяет получать результаты, которые не противоречат ранее наблюдаемым параметрам ветровых волн на Братском водохранилище [5] и могут быть использованы при решении различных прикладных задач, в том числе и при расчете трансформации берегов Братского водохранилища.

Список литературы

1. Ахиярова Д. Ф. Определение пространственно–временных характеристик метеопараметров по данным реанализа [Электронный ресурс] / Д. Ф. Ахиярова.

Г. Е. Корчагин. – URL: http://green.ksu.ru/content/vrnmk3/Секция2/01-Ахиярова_Корчагин.pdf.

2. *Барышников Н. Б.* Руслые процессы : учебник / Н. Б. Барышников. – СПб. : РГГМУ, 2008. – 439 с.

3. *Борисенков Е. П.* Основные тенденции естественных и антропогенных изменений климата / Е. П. Борисенков // Физические основы современного изменения климата. – М. : Наука, 1981. – С. 4–40.

4. ВСН 163–83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 142 с.

5. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Братское водохранилище. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 166 с.

6. *Ефимов В. В.* Статистическая оценка ветровых данных реанализа по данным срочных измерений ветра на метеостанциях северного побережья Черного моря / В. В. Ефимов, О. И. Комаровская, В. А. Наумова // Системы контроля окружающей среды : сб. науч. тр. – Севастополь : НАН Украины, МГИ, 2004. – С. 214–216.

7. *Ефимов В. В.* Численное моделирование ветрового волнения в северо-западной части Черного моря / В. В. Ефимов, В. Н. Белокопытов, О. И. Комаровская // Мор. гидрофиз. журн. – 2000. – № 6. – С. 36–44.

8. *Жуков Л. А.* Общая океанология / Л. А. Жуков. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 376 с.

9. *Истошин Ю. В.* Океанология / Ю. В. Истошин. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 470 с.

10. *Карнаухова Г. А.* Процессы осадкообразования в водохранилищах Ангарского каскада : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.27 / Г. А. Карнаухова. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2009. – 44 с.

11. Мезоклиматические и аэросиноптические условия формирования ионного состава атмосферного аэрозоля в высокогорных районах Восточного Саяна / Л. П. Голобокова [и др.] // География и природные ресурсы. – 2006. – № 2. – С. 83–88.

12. *Овчинников Г. И.* Изменение геологической среды в зонах влияния ангаро-енисейских водохранилищ: монография / Г. И. Овчинников, С. Х. Павлов, Ю. Б. Тржцинский. – Новосибирск : Наука, 1999. – 253 с.

13. Описание методик и технологий, применяемых в компании ИНФОМАР (на примере Каспийского моря) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.infomarcospany.com/методики.pdf>.

14. Р 31.3.07–01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. – Введ. 01.01.2002. – М. : Союзморниипроект, 2001. – 75 с.

15. *Семенников В. М.* Водные пути Восточно-Сибирского бассейна [Электронный ресурс] / В. М. Семенников. – URL: http://egov-buryatia.ru/fileadmin/minprom/transport/vodnyi_transport.doc.

16. СНиП 2.06.04–82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М. : Госстрой СССР, 1989. – 79 с.

17. Справочник по климату СССР. Вып. 22. Иркутская область и западная часть Бурятской АССР. Ч. 3. Ветер. – Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 353 с.

18. *Тржцинский Ю. Б.* Техногенные изменения геологической среды (на примере Сибирского региона) : монография / Ю. Б. Тржцинский ; науч. ред. К. Г. Леви. – Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2007. – 115 с.

19. Экологические изменения геологической среды под влиянием крупных водохранилищ Сибири / В. С. Кусковский [и др.] // Сиб. экол. журн. – 2000. – № 2. – С. 135–148.

20. Akima H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points / H. Akima // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1978. – N. 4. – P. 148–159.

21. Google Earth [Electronic resource]. – URL: <http://www.google.com/earth/index.html> (12.06.2011).

22. The Earth System Research Laboratory [Electronic resource]. – URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (22.05.2011).

23. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay and Coauthors // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – N 77. – P. 437–471.

24. The WAMDI Group. The WAM Model: A Third Generation Ocean Wave Prediction Model // Journal of Physical Oceanography. – 1988. – Vol. 18, N 12. – P. 1775–1810.

The estimation of characteristics of the Bratskoye Reservoir wave regime

E. N. Sutyryna

Annotation. The results of the reanalysis NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction / The National Center for Atmospheric Research) data applying to the water-body wave regime characteristics estimation are presented in this paper (by the sample of the Bratskoye Reservoir).

Key words: wave regime, Bratskoye Reservoir, reanalysis NCEP/NCAR data.

*Сутырина Екатерина Николаевна
кандидат географических наук, доцент
Иркутский госуниверситет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–10–72*