

УДК 551.466.2

Ф.Н. Гиппиус¹, В.С. Архипкин², А.В. Фролов³

СЕЗОННЫЙ ХОД ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ КАСПИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЛНЕНИЯ И ГЛУБИНЫ МОРЯ

На основе эмпирического соотношения, описывающего изменения испарения с поверхности водоема под влиянием его глубины и высоты волн, выполнена оценка интенсификации среднемесячной величины испарения с поверхности Каспийского моря. Данные, положенные в основу исследований, включали в себя цифровую модель рельефа дна Каспийского моря с пространственным разрешением 5 км, сведения о высоте значительных волн и величине скрытой теплоты испарения. Высота значительных волн рассчитана с помощью численной модели SWAN на основе полей ветра, полученных из метеорологического реанализа NCEP/NCAR. Этот же реанализ использован в качестве источника данных о величине испарения.

Рассмотрены осредненные величины для февраля, мая, августа и ноября. Влияние мелководий и волнения наиболее явно выражено в мелководном Северном Каспии. Приrost испарения посредством учета глубины моря и волнения здесь колеблется от 10–15 Вт/м² в мае до 20–40 Вт/м² в августе. Другие области, где отмечен этот эффект, – прибрежная акватория в юго-восточной части моря и район Апшеронского полуострова; в последнем интенсификация испарения выявлена в ноябре и феврале, т.е. в периоды наибольшей штормовой активности.

Ключевые слова: Каспийское море, испарение, ветровое волнение, сезонный ход, реанализ NCEP/NCAR, модель SWAN.

Введение. Процесс испарения влаги с поверхности водных объектов – один из ключевых механизмов их взаимодействия с атмосферой. Он заметно влияет на водный баланс озер, морей и океанов. Другое очевидное проявление взаимодействия гидросферы и атмосферы – ветровое волнение, образующееся на поверхности водных объектов. Естественно, встает вопрос о том, каким образом эти процессы влияют друг на друга и насколько существенно такое воздействие.

Испарение – основная расходная часть водного баланса Каспийского моря [Панин и др., 2005]. В ряде работ, например, в [Benilov et al., 1974; Китайгородский и др., 1973; Голицын, Грачев, 1980; Грачев, Панин, 1984; Панин, Кривицкий, 1992], показано, что температура, влажность, скорость ветра и поток количества движения зависят от ветровых волн на поверхности акватории.

В работе [Панин и др., 2006] на основе экспериментальных измерений, выполненных в ходе трех экспедиций в Северном Каспии в 1990–1992 гг., показано, что количество испаряющейся с поверхности водоема влаги зависит, в том числе, и от глубины дна и высоты волн в рассматриваемом регионе. Значимость последних факторов объясняется тем, что на мелководьях под влиянием донного трения волны становятся более крутыми и обрушиваются раньше, чем на глубоководных акваториях, соответственно, повышается шероховатость водной поверхности и происходит интенсификация турбулентного обмена влагой,

теплом и импульсом. Так, при скорости ветра 10 м/с интенсификация испарения у побережья Северного Каспия достигает 15%, а при скорости ветра 20 м/с – 30%.

Испарение можно измерить прямым методом, основанным на непосредственном измерении турбулентных флуктуаций влажности воздуха и вертикальной компоненты скорости ветра с последующим вычислением мгновенных значений вертикальных потоков [Панин и др., 2005]. В то же время у таких инструментальных измерений *in situ* есть существенный недостаток – в подавляющем большинстве случаев они обладают узким пространственно-временным охватом, поскольку выполняются в ходе непродолжительных и локальных исследований. Такие данные не позволяют судить о процессах в больших пространственных и временных масштабах. В случае Каспийского моря при таком подходе невозможно уточнить вклад испарения в колебания уровня моря [Голицын, Панин, 1989]. При исследовании испарения эту проблему можно решить применением параметризации турбулентных потоков [Панин, 1987]. При изучении ветрового волнения этот пробел позволяют заполнить, с одной стороны, метеорологические реанализы, а с другой – применение численных моделей гидродинамических процессов.

Цель работы – оценка сезонной изменчивости испарения со всей акватории Каспийского моря с учетом влияния ветрового волнения и рельефа дна на основе ретроспективного массива данных о вол-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, науч. с.; e-mail: fedor.gippius@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Институт водных проблем РАН, лаборатория глобальной гидрологии, ст. науч. с., докт. тех. н.; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

нении. Отметим, что ранее такие исследования не проводились; оценки интенсификации испарения, приведенные, например, в [Панин и др., 2005; Панин и др., 2006], основаны на фиксированных величинах скорости и направления ветра.

Материалы и методы исследований. Расчет параметров ветрового волнения выполнен с применением численной спектральной волновой модели третьего поколения SWAN [Booij et al., 1999; Ris et al., 1999; SWAN, 2004]. Эта модель создана в первую очередь для расчета параметров ветрового волнения в прибрежных акваториях [Gorrell et al., 2011; Zijlema et al., 2010], в то же время она пригодна и для исследований в масштабах морей и океанов [Rusu et al., 2008; van Ledden et al., 2009]. Есть сведения о применении этой модели для оценки энергетического потенциала ветрового волнения на Каспийском море [Rusu, Onea, 2013].

Численная модель SWAN была настроена следующим образом. Экспоненциальный рост волн задавался в соответствии с [Komen et al., 1984], донное трение – согласно работе [Hasselmann et al., 1973]. Разрешение по направлению распространения волн и волновой энергии составляло 1° ; в частотном пространстве были заданы 27 логарифмически распределенных значений, расположенных в диапазоне от 0,7 до 1 Гц. Временной шаг расчетов составил 30 мин. Для каждого из этих сроков вычисляли величины значимой высоты волны, периода и длины волн, их средней длины и направления, а также величины переноса волновой энергии в зональном и меридиональном направлениях. В свою очередь каждые 3 часа эти данные записывали в файл с результатами вычислений, которые и использованы для дальнейшего анализа. Вычисления выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова «Ломоносов» [Архипкин и др., 2014]. Расчет параметров ветрового волнения выполнялся на прямоугольной расчетной сетке с пространственным разрешением 5 км [Arkhipkin et al., 2012].

В качестве входных параметров для расчета применялись поля скорости и направления ветра, полученные из метеорологического реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001]. Из этого же источника получены сведения о скрытой теплоте испарения. Реанализ NCEP/NCAR содержит значения метеорологических параметров, равномерно распределенные в пространстве с разрешением $1,875^\circ$ в меридиональном и $1,9046^\circ$ в широтном направлениях. Временное разрешение реанализа NCEP/NCAR составляет 6 ч. Мы рассматривали период с 1949 по 2010 г. Значения скорости и направления ветра, а также скрытой теплоты испарения интерполировали из узлов реанализа в узлы расчетной сетки.

Интенсификацию испарения за счет мелководий и волн рассчитывали для каждого узла сетки по зависимости, определенной в [Панин и др., 2006]:

$$E^{SW} = E + Ek \frac{SW}{H} \frac{h}{H} \approx E(1 + 2h/H),$$

где E^{SW} – среднемесячное испарение с учетом интенсификации, E – среднемесячное испарение без учета интенсификации по данным реанализа NCEP/NCAR, h – среднемесячная высота значительных волн по результатам расчета модели SWAN, H – глубина водоема в узле сетки, $k_E^{SW} \approx 2$ – эмпирический коэффициент.

Результаты исследований и их обсуждение. Для оценки интенсификации испарения с поверхности Каспийского моря рассмотрим поля следующих величин:

- скрытая теплота испарения без коррекции, полученная из реанализа NCEP/NCAR;
- скрытая теплота испарения с коррекцией, рассчитанная по [Панин и др., 2006];
- разность этих двух значений.

Чтобы отследить их сезонный ход, рассмотрены четыре месяца, которые соответствуют временам года, – февраль, май, август и ноябрь.

В феврале часть акватории Каспийского моря покрыта льдом, который блокирует испарение. Сведения о распространении льда приводятся по [Антонюк, 2013]. На свободной от льда поверхности наиболее интенсивное испарение отмечено у восточного берега Каспия в районе залива Кара-Богаз-Гол. По данным реанализа NCEP/NCAR его величина здесь составляет более 120 Вт/м^2 . Учет высоты волн и глубины моря приводит к тому, что величина испарения повышается на $5\text{--}10 \text{ Вт/м}^2$ вдоль всего восточного берега моря, а максимальные значения испарения превышают 130 Вт/м^2 . Интенсификация испарения на $5\text{--}7 \text{ Вт/м}^2$ также отмечается у побережья Апшеронского п-ова. В мягкие зимы, когда ледяной покров на мелководном Северном Каспии выражен слабо, у Апшеронского п-ова отмечается более выраженная интенсификация испарения. Оно может возрастать более чем на 25 Вт/м^2 – с 100 до 125 Вт/м^2 и более. На юго-восток от Аграханского п-ова, где испарение по данным реанализа NCEP/NCAR минимально и составляет $<55 \text{ Вт/м}^2$, влияние волнения и глубины моря приводит к его незначительной интенсификации приблизительно на $3\text{--}5 \text{ Вт/м}^2$. У южного берега моря интенсификация испарения не отмечена из-за отсутствия здесь обширных мелководий (рис. 1).

В мае величины испарения с акватории моря наименьшие по сравнению с остальными рассматриваемыми месяцами. Его максимальные значения фиксируются в прибрежной части Северного Каспия, где они составляют $>70 \text{ Вт/м}^2$. На большей части моря испарение не превышает 40 Вт/м^2 . Учет волнения и глубины моря приводит к следующим результатам: на отдельных участках Северного Каспия интенсификация испарения превышает 15 Вт/м^2 ; в целом же для этого района моря характерны величины интенсификации испарения в $5\text{--}15 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, испарение с учетом интенсификации достигает $85\text{--}90 \text{ Вт/м}^2$. Меньшая интенсификация испарения, не превышающая 5 Вт/м^2 , также отмечается в узкой прибрежной полосе на юго-востоке моря (рис. 2).

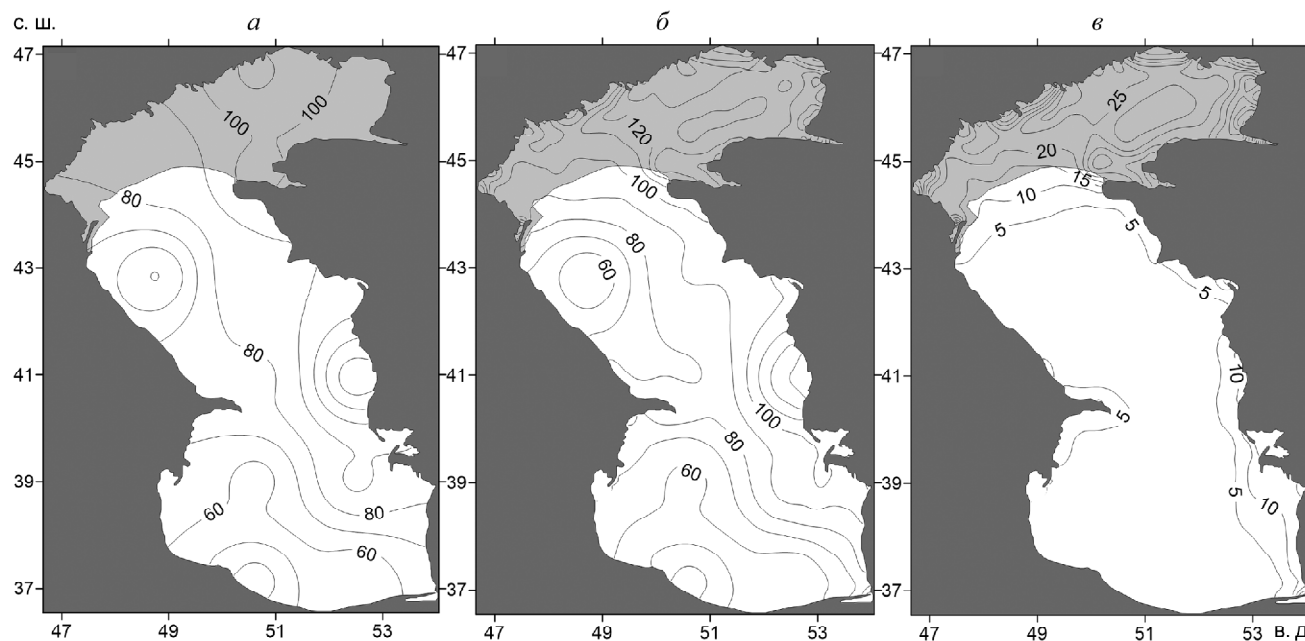


Рис. 1. Распределение средних многолетних величин скрытой теплоты испарения (Вт/м^2) с поверхности Каспийского моря в феврале без учета ветрового волнения (а), с его учетом (б), а также разница между ними (в). Область распространения льда в средние по суровости зимы затемнена

Fig. 1. Distribution of the average latent heat net flux (W/m^2) from the Caspian Sea surface in February without the influence of wind waves (a), with account of their influence (б) and the difference between these values (в). The area covered by ice in an average winter is dashed out

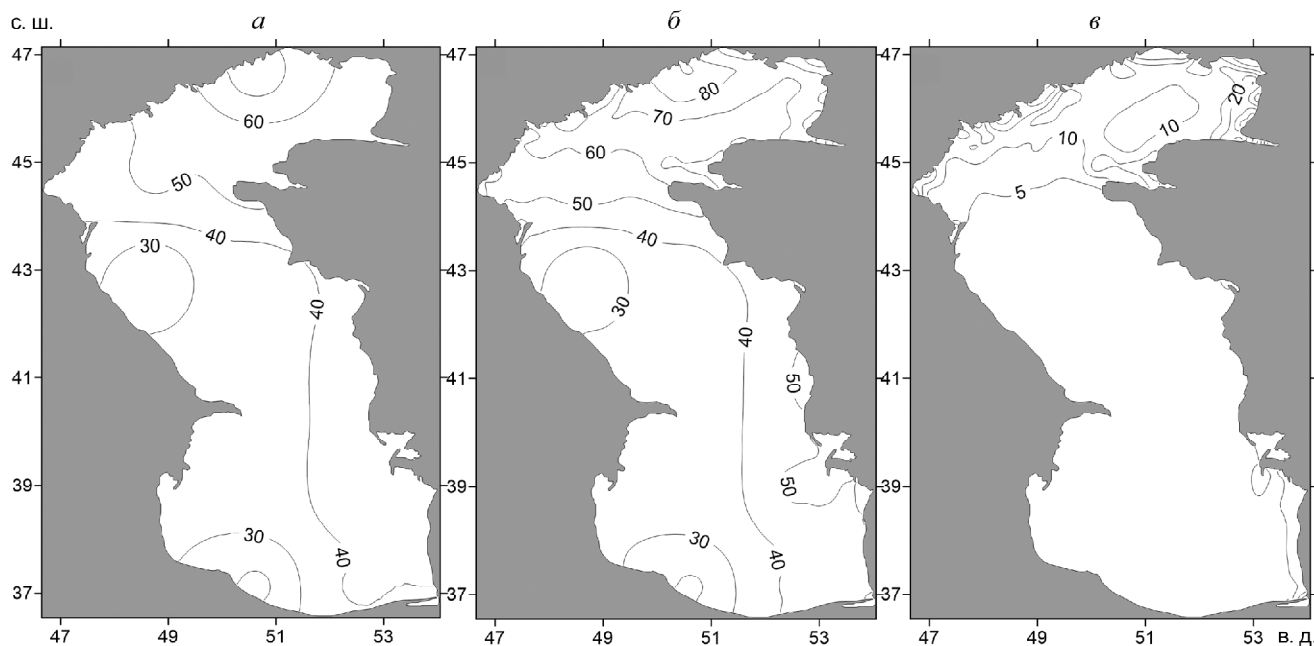


Рис. 2. Распределение средних многолетних величин скрытой теплоты испарения (Вт/м^2) с поверхности Каспийского моря в мае без учета ветрового волнения (а), с его учетом (б), а также разница между ними (в)

Fig. 2. Distribution of the average latent heat net flux (W/m^2) from the Caspian Sea surface in May without the influence of wind waves (a), with account of their influence (б) and the difference between these values (в)

Испарение в августе усиливается по сравнению с весенними месяцами. Так, в Северном Каспии среднемесячные величины испарения колеблются в пределах $140\text{--}170 \text{ Вт/м}^2$. Другая область высокого испарения находится на западе от п-ова Челекен, где его значения превышают 180 Вт/м^2 . Пересчет значений испарения с учетом влияния волн и мелководий показывает, что в Северном Каспии ис-

парение возрастает в основном на $20\text{--}30 \text{ Вт/м}^2$, а на некоторых участках и на 40 Вт/м^2 . Таким образом, испарение здесь увеличивается до $160\text{--}190 \text{ Вт/м}^2$. У юго-восточного побережья Каспия также отмечается интенсификация испарения приблизительно на $10\text{--}25 \text{ Вт/м}^2$, его величины у п-ова Челекен превышают 190 Вт/м^2 с учетом коррекции (рис. 3).

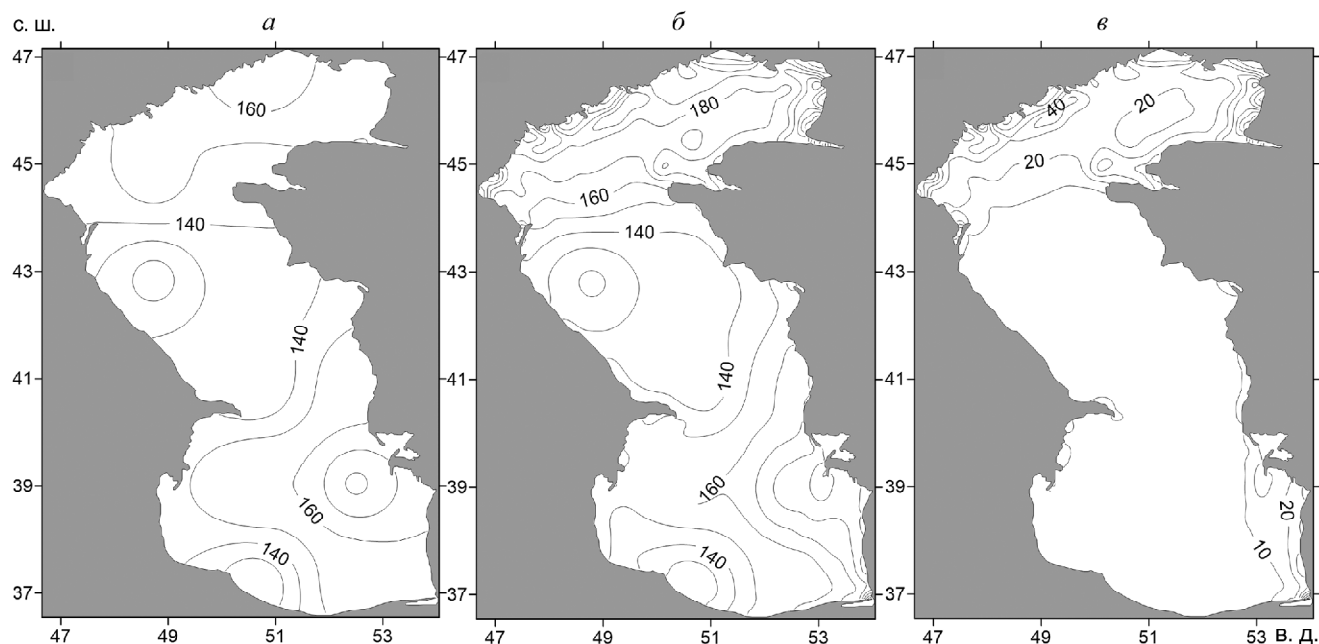


Рис. 3. Распределение средних многолетних величин скрытой теплоты испарения (Вт/м^2) с поверхности Каспийского моря в августе без учета ветрового волнения (а), с его учетом (б), а также разница между ними (в)

Fig. 3. Distribution of the average latent heat net flux (W/m^2) from the Caspian Sea surface in August without the influence of wind waves (a), with account of their influence (б) and the difference between these values (в)

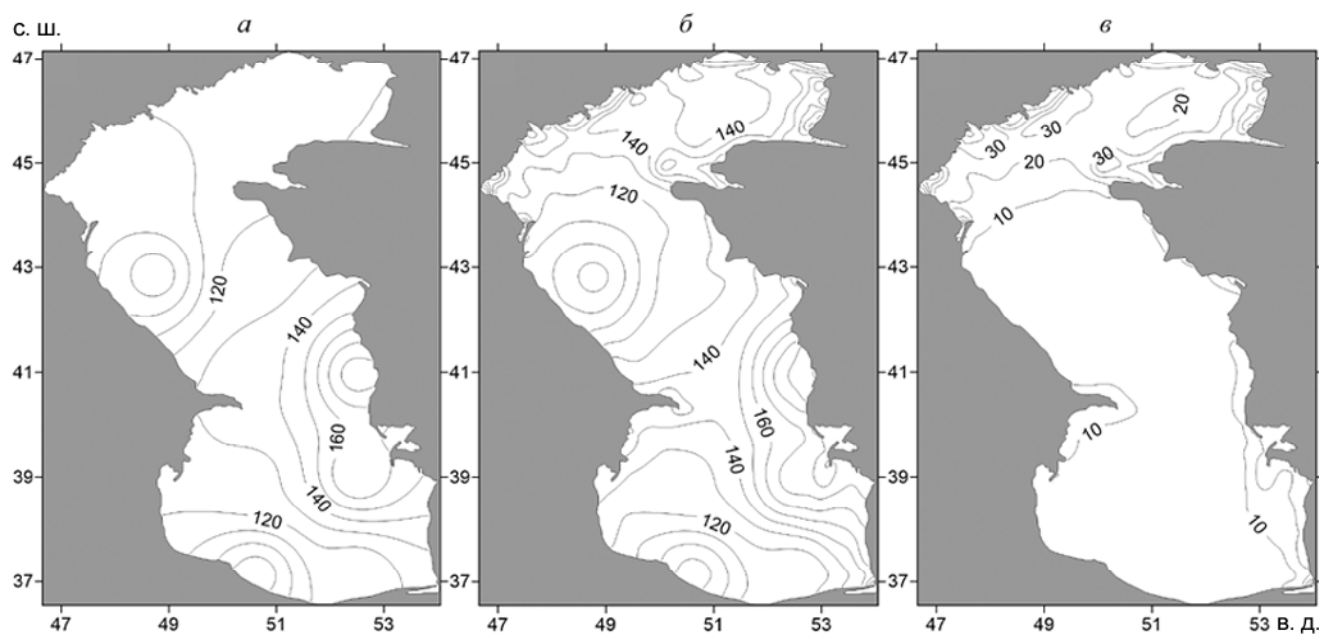


Рис. 4. Распределение средних многолетних величин скрытой теплоты испарения (Вт/м^2) с поверхности Каспийского моря в ноябре без учета ветрового волнения (а), с его учетом (б), а также разница между ними (в)

Fig. 4. Distribution of the average latent heat net flux (W/m^2) from the Caspian Sea surface in November without the influence of wind waves (a), with account of their influence (б) and the difference between these values (в)

Наконец, в ноябре испарение наиболее интенсивно у восточного берега Каспия; его величины здесь превосходят $160\text{--}180 \text{ Вт/м}^2$. В мелководном Северном Каспии значения испарения однороднее, чем в остальном море, они плавно возрастают с $\sim 105 \text{ Вт/м}^2$ в западной части до 120 Вт/м^2 в восточной. Как и во все остальные месяцы, наиболее заметная интенсификация испарения происходит в се-

верной части моря, где она достигает и иногда превышает 30 Вт/м^2 . В абсолютном выражении это означает, что величина испарения в большей части этого района увеличивается с упомянутых ранее значений до $130\text{--}140 \text{ Вт/м}^2$. Интенсификация испарения также отмечается в юго-восточной прибрежной акватории и у побережья Апшеронского п-ова. В этих районах она составляет $20\text{--}30$ и $10\text{--}20 \text{ Вт/м}^2$

соответственно (рис. 4). Также отметим, что интенсификация испарения у Апшеронского п-ова отмечается только осенью и зимой, когда штормовая активность максимальна и, соответственно, ветровые волны достигают наибольших высот.

Выводы:

— с помощью методики, описанной в [Панин и др., 2006], впервые оценено влияние мелководий и волнения на средние месячные величины испарения с акватории Каспийского моря. Влияние мелководий и волнения выражено наиболее явно в мелководном Северном Каспии. Прирост испарения с учетом глубины моря и волнения здесь колеблется от 10–15 Вт/м² в мае до 20–40 Вт/м² в августе. Другие области, где

отмечен этот эффект, — прибрежная акватория в юго-восточной части моря и район Апшеронского п-ова; в последнем интенсификация испарения отмечается в ноябре и феврале, т.е. в периоды наибольшей штормовой активности;

— сделано предположение, что учет влияния мелководий и волнения на количество испаряемой влаги позволит уточнить водный баланс Каспийского моря. Указанное, а также оценка межгодовой изменчивости испарения с мелководных акваторий моря и определение его интенсификации во время сильных штормов могут стать логичным продолжением описанных здесь исследований.

Благодарности. Авторы считают своим долгом отметить, что статья посвящается светлой памяти профессора Геннадия Николаевича Панина, которому принадлежит идея исследования и под чьим руководством выполнена значительная часть работы.

Исследование выполнено за счет совместного гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (проект № 13-05-41007 РГО_а «Анализ природы климатических изменений европейской территории России и сценарный прогноз уровня режима Каспийского моря»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонюк А.Ю. Изменчивость океанологических процессов и полей во внутренних морях (Черном, Азовском, Каспийском) на основе дистанционного зондирования: Автореф. канд. дисс. М., 2013.

Архипкин В.С., Добролюбов С.А., Гиппиус Ф.Н. и др. Моделирование экстремальных природных явлений в морях России с использованием суперкомпьютерных технологий // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2014. С. 119–126.

Голицын Г.С., Грачев А.А. Скорости и тепломассообмен при конвекции в двухкомпонентной среде // Докл. АН СССР. 1980. Т. 225, № 3. С. 548–552.

Голицын Г.С., Панин Г.Н. О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 57–64.

Грачев А.А., Панин Г.Н. Параметризация потоков явного и скрытого тепла над водной поверхностью в штормовых условиях // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1984. № 5. С. 364–371.

Китайгородский С.А., Кузнецов О.А., Панин Г.Н. О коэффициентах сопротивления, теплообмена и испарения и расчетах потоков импульса, тепла и влаги над морской поверхностью в атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9, № 11. С. 1135–1141.

Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987.

Панин Г.Н., Кривитский С.В. Аэродинамическая шероховатость поверхности водоема. М.: Наука, 1992.

Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005.

Панин Г.Н., Насонов А.Е., Фокен Т. Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий // Изв. РАН. Сер. физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 3. С. 367–383.

Arkhipkin V.S., Malyarenko E.A., Surkova G.V. Analysis of storm waves on the Caspian sea // Geophys. Res. Abstr. 2012. Vol. 14. P. 3972–3972.

Benilov A.Yu., Kuznetsov O.A., Panin G.N. On the analysis of wind wave-induced disturbances of the atmospheric turbulent

surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 1974. Vol. 6, N 1/2. P. 269–285.

Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 140, N C4. P. 7649–7666.

Gorrell L., Raubenheimer B., Elgar S., Guza R.T. SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. P. 510–516.

Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E. et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl. 1973. Vol. 12, A8.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 11, N 3. P. 437–471.

Kistler R., Collins W., Saha S. et al. The NCEP–NCAR 50–Year reanalysis: Monthly means CD–ROM and documentation // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2001. Vol. 82. P. 247–267.

Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // J. Phys. Oceanogr. 1984. Vol. 14. P. 1271–1285.

Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, N C4. P. 7667–7681.

Rusu E., Onea F. Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea // Energy. 2013. Vol. 50. P. 1–14.

Rusu E., Pilar P., Guedes Soares C. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models // Ocean Engineering. 2008. Vol. 35. P. 1357–1371.

SWAN. User manual SWAN Cycle III, vers. 40.41. Delft University of Technology. December 2004. URL: <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>

Van Leeden M., Vaughn G., Lansen J. et al. Extreme wave event along the Guyana coastline in October 2005 // Continental Shelf Res. 2009. Vol. 29. P. 352–361.

Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57. P. 267–277.

Поступила в редакцию 30.11.2015
Принята к публикации 02.06.2016

F.N. Gippius¹, V.S. Arkhipkin², A.V. Frolov³SEASONAL VARIATIONS OF EVAPORATION FROM
THE CASPIAN SEA SURFACE WITH ACCOUNT
OF WIND WAVES AND SEA DEPTH

An empirical relationship describing the changes in evaporation from a water body in relation to its depth and wave heights is used to assess the intensification of monthly average evaporation from the Caspian Sea surface. The data used in this study includes the digital bottom relief model of the Caspian Sea with a spatial resolution of 5 km, data on significant wave heights (SWH) and the latent heat net flux. SWH values were calculated by means of the SWAN numerical model based on wind fields from the NCEP/NCAR reanalysis. Latent heat net flux values were derived from the NCEP/NCAR reanalysis as well.

The averaged February, May, August and November values are described in this study. The impact of waves and bottom depth on the evaporation is most expressive in the shallow northern part of the Caspian Sea. The values of evaporation increase range there from 10–15 W/m² in May to 20–40 W/m² in August. This effect is also observed in the southeastern areas of the sea and off the Apsheron Peninsula; in the latter case the intensification of evaporation is observed only in February and November, i.e. during the stormiest seasons.

Key words: Caspian Sea, evaporation, wind waves, seasonal variations, NCEP/NCAR reanalysis, SWAN model.

Acknowledgements. The authors are bound in honor to dedicate the article to the blessed memory of Professor Gennady Nikolayevich Panin, the architect of the concept of the study and the supervisor of a good share of investigations.

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project N 13-05-41007).

REFERENCES

- Antonjuk A.Ju. Izmenchivost' okeanologicheskikh processov i polej vo vnutrennih morjakh (Chernom, Azovskom, Kaspijskom), na osnove distancionnogo zondirovaniya. Diss. na soisk. uch. st. kandidata geogr. nauk [Variability of oceanological processes in internal seas (Black Sea, Sea of Azov, Caspian Sea) based on remote sensing]: PhD thesis, Moscow, 2013 (in Russian).
- Arkhipkin V.S., Malyarenko E.A., Surkova G.V. Analysis of storm waves on the Caspian sea // *Geophys. Res. Abstr.* 2012. Vol. 4. P. 972–3972.
- Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A., Gippius F.N. et al. Modelirovanie jekstremal'nyh prirodnyh javlenij v morjakh Rossii s ispol'zovaniem superkomp'yuternyh tehnologij [Numerical modelling of natural hazards in the Russian Seas Using Supercomputer Technologies]. Al'manah «Cuperkomp'yuternye tehnologii v nauke, obrazovanii i promyshlennosti», Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2014, pp. 119–126 (in Russian).
- Benilov A.Yu., Kuznetsov O.A., Panin G.N. On the analysis of wind wave-induced disturbances of the atmospheric turbulent surface layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 1974. Vol. 6, N 1/2. P. 269–285.
- Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 140, N C4. P. 7649–7666.
- Golicyn G.S., Grachev A.A. Skorosti i teplomassoobmen pri konvekcii v dvuhkomponentnoj srede [Velocities and exchange of heat and mass during convection in a two-component medium], *Doklady AN SSSR*, 1980, T. 225, no 3. pp. 548–552 (in Russian).
- Golicyn G.S., Panin G.N. O vodnom balanse i sovremennyh izmenenijah urovnja Kaspija [On the water balance and actual fluctuations of the Caspian Sea level], *Meteorologija i gidrologija*, 1989, no 1, pp. 57–64 (in Russian).
- Gorrell L., Raubenheimer B., Elgar S., Guza R.T. SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry // *Coastal Engineering*, 2011. Vol. 58. P. 510–516.
- Grachev A.A., Panin G.N. Parametrizacija potokov javnogo i skrytogo tepla nad vodnoj poverhnost'ju v shtilevyh uslovijah [Parametrization of sensible and latent heat fluxes over the water surface during calm conditions], *Izv. AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1984, no 5, pp. 364–371 (in Russian).
- Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E. et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.* 1973. Vol. 12, A8.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. Vol. 11, N 3. P. 437–471.
- Kistler R., Collins W., Saha S. et al. The NCEP–NCAR 50–Year reanalysis: Monthly means CD–ROM and documentation // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2001. Vol. 82. P. 247–267.
- Kitajgorodskij S.A., Kuznetsov O.A., Panin G.N. O koeficiente soprotivlenija, teploobmena i isparenija i raschetah potokov impul'sa, tepla i vlagi nad morskoi poverhnost'ju v atmosfere [On the coefficients of resistance, heat exchange and evaporation and the calculations of momentum, heat and mass fluxes in the atmosphere over the sea surface], *Izvestija AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1973. Vol. 9, no 11, pp. 1135–1141 (in Russian).
- Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. Vol. 14. P. 1271–1285.
- Panin G.N. Isparenje i teploobmen Kaspijskogo morja [Evaporation and heat exchange of the Caspian Sea], Moscow, Nauka, 1987 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Scientific Researcher; e-mail: fedor.gippius@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Associate Professor, Ph.D in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Institute of Water Problems, RAS, Laboratory of Global Hydrology, Senior Scientific Researcher, Doctor of Engineering Sciences; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

Panin G.N., Krivitskij S.V. Ajerodinamicheskaja sherohovatost' poverhnosti vodoema [Aerodynamic roughness of water body surface], Moscow, Nauka, 1992 (in Russian).

Panin G.N., Mamedov R.M., Mitrofanov I.V. Sovremennoe sostojanie Kaspijskogo morja [Modern state of the Caspian Sea], Moscow, Nauka, 2005 (in Russian).

Panin G.N., Nasonov A.E., Foken T. Isparenje i teploobmen vodoema s atmosferoj pri nalichii melkovodij [Evaporation and heat exchange of a water body with the atmosphere in the case of shallow waters], *Izvestija Rossijskoj akademii nauk, Fizika atmosfery i okeana*, 2006. Vol. 42, no 3, pp. 367–383 (in Russian).

Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, N C4. P. 7667–7681.

Rusu E., Onea F. Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea // *Energy*. 2013. Vol. 50. P. 1–14.

Rusu E., Pilar P., Guedes Soares C. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models // *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35. P. 1357–1371.

SWAN. User manual SWAN Cycle III, vers. 40.41. Delft University of Technology. December 2004. URL: <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>

Van Ledden M., Vaughn G., Lansen J. et al. Extreme wave event along the Guyana coastline in October 2005 // *Continental Shelf Res.* 2009. Vol. 29. P. 352–361.

Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 57. P. 267–277

Received 30.11.2015

Accepted 02.06.2016