

УДК 551.556.464

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37487

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «НЕВЯЗОК» ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОДООБМЕНА ЛИТОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

© А. Б. Капочкина, В. И. Михайлов, Н. В. Кучеренко

*Невязки водного баланса Каспийского моря и Куяльницкого лимана использованы для приблизительной оценки объемов подземного водообмена. Объемы подземного водообмена по Каспийскому морю и по Куяльницкому лиману совпадают. Результаты расчетов объемов подземного водообмена по невязкам водного баланса Куяльницкого лимана и Каспийского моря согласуются с объемами, полученными изотопными методами для Атлантического океана*

**Ключевые слова:** подземные воды, субмаринные источники, водный баланс, Каспийское море, дебет источника

*Residuals of water balance of the Caspian Sea and Kuyalnik Estuary used for a rough estimate of the volume of underground water exchange. Volumes of underground water exchange of the Caspian Sea and the Kuyalnik Estuary is the same. The results of calculations the volume of underground water exchange with the use of residuals water balance of Kuyalnik Estuary and the Caspian Sea is in line with the amount obtained by isotope techniques to the Atlantic Ocean*

**Keywords:** groundwater, submarine springs, water balance, Caspian Sea, source debit

### 1. Введение

В конце XX века считалось достоверно установленным, что Мировой океан получает незначительный объем подземного стока с суши и еще менее значимые объемы глубинных и ювенильных вод в зонах океанского спрединга. В то же время Зеленовым К. К. [1] было показано, что на более чем 15 % глубоководных океанологических станций Атлантического океана в придонном слое измерены температурные инверсии толщиной около 500 метров. Работами экспедиций МГИ АН СССР под руководством академика Шнюкова Е. Ф. [2, 3] на материковом склоне Черного моря были открыты массовые выходы источников подземных вод, которые, по его мнению, в соответствии со значимым дебитом, способны формировать соответствующую водную массу Черного моря.

Исходя из противоречивости представлений об объеме подземного водообмена в океане, определение этого объема можно считать актуальной проблемой. В связи с тем, что методы прямых измерений дебета подземных источников находятся в стадии разработки, оценки объемов подземного водообмена представляют определенную новизну и имеют практическое значение.

### 2. Постановка проблемы

В связи с тем, что возможность применения водобалансовых расчетов в работе [5] для определения объемов подземного водообмена была обоснована недостаточно, что вызывало определенные замечания [9], существует необходимость выполнения дополнительных расчетов. Помимо этого важно сравнить оценки дебета рассредоточенной субмаринной разгрузки подземных вод, полученные для акватории Каспийского моря с соответствующими оценками для акваторий большей и меньшей площади.

Целью исследования является использование водобалансовых расчетов Каспийского моря за многолетний период для оценки экстремальных значений подземного водообмена.

Достижение поставленной цели возможно путем решения задач:

- 1) определение теоретической ошибки решения уравнения водного баланса;
- 2) определение систематической ошибки уравнения водного баланса;
- 3) определение соответствия ряда невязки водного баланса нормальному закону распределения случайных величин;
- 4) сопоставление экстремальных значений невязок водного баланса с теоретической погрешностью и СКО;
- 5) выполнить сравнительный анализ оценок подземного водообмена, полученных для различных районов.

### 3. Литературный обзор

Считается общепризнанным, что в отличие от суши, методическое обеспечение морских гидрогеологических работ до настоящего времени не разработано. Кроме этого существуют и принципиальные отличия существования и режима подземных вод на суше и в океане [3]. В работе [4] описаны методические подходы к определению дебета субмаринной разгрузки подземных вод в прибрежной зоне, однако их точность очень низкая.

С практической точки зрения, наиболее важны интегральные характеристики рассредоточенной субмаринной разгрузки подземных вод на значительных площадях. Одним из примеров количественной оценки объемов субмаринной разгрузки подземных вод являются результаты исследований в пределах акватории Каспийского моря [5, 6]. Сущность метода состоит в составлении уравнения

среднеголетнего водного баланса и оценке значений подземного водообмена по разности между осадками, испарением и речным стоком. В то же время необходимо признать, что оценки подземного водообмена, полученные этим методом, требуют дополнительного обоснования [8].

По поводу причин изменений уровня Каспийского моря длительное время ведется научная дискуссия. Важно отметить, что даже сторонники климатической причины изменения уровня Каспия считают результаты водобалансовых расчетов достаточно проблемными. В работе [9] показано, что Волга дает не менее 80 % суммарного речного стока в море и около 70 % приходной части водного баланса Каспия. Однако коэффициент корреляции такой связи для периода 1900–1996 гг. составил всего 0,08, что вызывает много вопросов. Несколько лучшие результаты дает корреляция отдельно для периодов быстрого падения и повышения уровня. Коэффициенты корреляции равны соответственно 0,2 и 0,36 [9], однако это также указывает на отсутствие линейной связи между стоком Волги и изменением уровня Каспия.

По нашему мнению, факт отсутствия линейной зависимости между стоком Волги и уровнем Каспия, а так же отсутствие корреляции невязки водного баланса Каспия с членами приходной и расходной частей уравнения [7] указывает на наличие другого существенного

фактора, не учтенного в уравнении водного баланса. Таким фактором является подземный водообмен. По мнению академика Н. А. Шилов, на изменение уровня Каспийского моря существенно влияет водообмен с подземной гидросферой [5, 6]. В качестве индикатора характеристик гидрогеодеформационного поля в районе Каспия авторы выбрали землетрясения. Рассчитанный коэффициент корреляции невязок водного баланса с силой землетрясений составил 0,97 [6]. По данным работы [10] прохождение волны деформаций провоцирует разгрузку подземных вод в Каспий в объеме до 40–60 км<sup>3</sup>/год. Автор работы [6] утверждает, что «современный подъем уровня Каспия в среднем на 50 % был обусловлен разгрузкой в море подземных вод.

Кроме этого, отмечено, что с 1940 по 1966 гг. невязки водного баланса по Каспию и Аральскому морю равнялись по величине, но имели противоположный знак [5, 6, 11]. Это согласуется и с результатами сравнения невязок водного баланса Каспийского моря и Куяльницкого лимана [8].

#### 4. Результаты исследования соответствия невязок водного баланса Каспийского моря нормальному закону распределения случайных величин

Используем анализ невязок водного баланса (рис. 1), приведенных в работе [7] для уточнения оценок подземного водообмена в акватории Каспия.

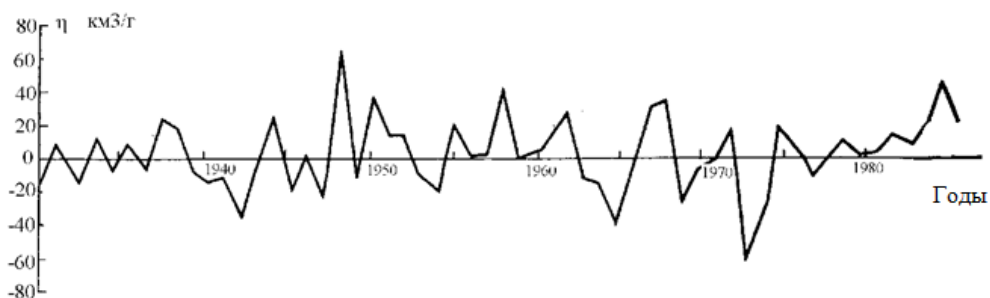


Рис. 1. Изменение во времени годовых значений невязок водного баланса Каспийского моря [7]

В уравнении водного баланса Каспийского моря не учитываются приток и сток подземных вод. Положительным значениям невязок соответствует необоснованное повышение уровня моря, отрицательным – снижение уровня. Среднее значение невязки не равно нулю. Оно составляет 3 км<sup>3</sup>/год [7], что свидетельствует о «смещенности» оценки среднего значения, то есть о существовании систематической ошибки, возможно связанной с неучтенным фактором. В уравнении водного баланса единственным неучтенным фактором был подземный водообмен [7]. По Зекцеру И. С. [4] суммарный расход подземных вод в результате водообмена суши и моря составляет 3,17 км<sup>3</sup>/год. Нам остается оценить интегральный объем рассредоточенной субмаринной разгрузки в пределах акватории моря.

В работе [6] оценена точность расчета водного баланса Каспия. Она составила 43 мм/год. Установлено, что за пределы точности расчета водного

баланса выходят 51 % невязок водного баланса, а за пределы двух стандартных отклонений – 20 % невязок водного баланса (вместо 5 %).

В дополнение, нами по нескольким статистическим критериям проведена проверка ряда невязок водного баланса Каспийского моря соответствию нормальному закону распределения случайных величин.

Первое необходимое условие нормального закона распределения  $X_{cp}=M_0=M_e$ . По нашим расчетам:  $X_{cp}=3$ ;  $M_0=-0,05$ ;  $M_e=1,5$ .

Второе необходимое условие  $E_x=As=0$ . По нашим расчетам:  $E_x=2,96$ ;  $As=-1,4$ . Дополнительно выполнена оценка близости к нулю величин  $E_x$  и  $As$  по методике Вайновского–Малинина [7]. Установлено:  $As/U_3=-4,47$ ;  $E_x/U_4=4,93$ ; а соотношение должно быть меньше 2.

Третье необходимое условие – одномодальность. гистограмма невязок водного баланса Каспия многомодальна (рис. 2).

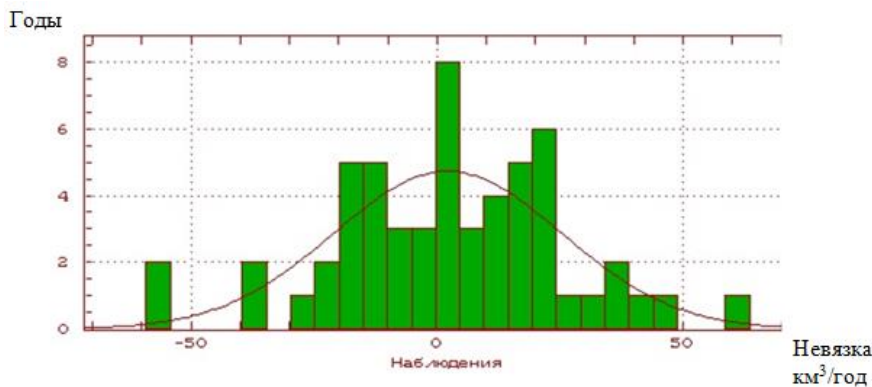


Рис. 2. Гистограмма невязок водного баланса Каспия иллюстрирует много модальность

Четвертое условие – отсутствие трендов. График невязки имеет линейный тренд

$$(\eta(t)=0,2394 \cdot t - 4,5571, \text{ где } t - \text{ время}).$$

Пятое условие спектр должен иметь вид «белого шума». Невязка водного баланса имеет периодическую составляющую (рис. 3).

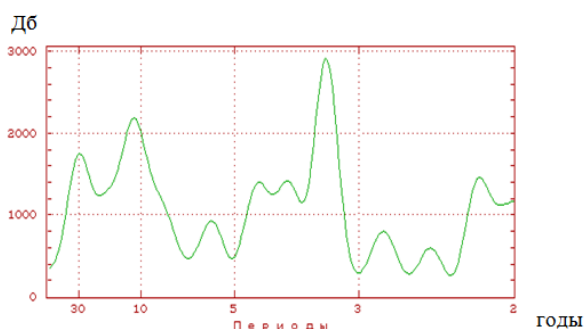


Рис. 3. Периодограмма невязок водного баланса Каспийского моря

Для проверки значимости этого периода была рассчитана интегрированная периодограмма теста на белый шум с 75 % доверительной границей (рис. 4).

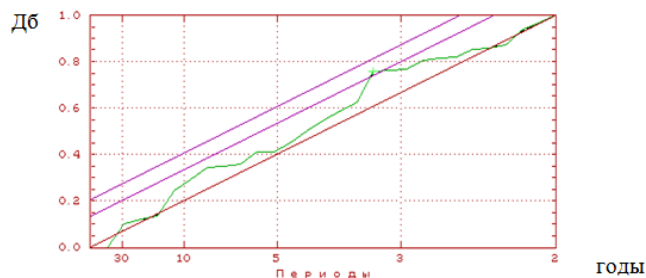


Рис. 4. Интегрированная периодограмма теста на белый шум с 75 % доверительной границей

Расчеты показали, что период изменения невязки 3,2 года является статистически значимым.

Вывод: невязки водного баланса ( $\eta$ ) нормальному закону распределения не подчиняются.

В итоге с большей степенью достоверности, по сравнению с работами [5, 6] доказано, что невязка водного баланса Каспийского моря – это неучтенная составляющая водного баланса (подземный водообмен).

Нами установлены временные промежутки, когда невязки водного баланса были систематически выше или ниже нуля. Вероятность таких комбинаций очень мала. Невязки водного баланса систематически были положительными (процесс интенсивного подземного питания) в: 1937–1938 гг., 1948–1952 гг., 1967–1968 гг., 1981–1985 гг., и отрицательными (процесс изъятия вод моря литосферой) в 1939–1943 гг., 1954–1955 гг., 1962–1965 гг., 1973–1974 гг. Длительность циклов с системными положительными невязками равна длительности циклов с отрицательными системными невязками.

Абсолютные экстремумы невязок водного баланса зафиксированы в 1948 году (+6·σ) и в 1973 году (−5·σ). В абсолютных значениях величины невязок по объему соответствуют среднегодовому количеству осадков. Экстремальные значения подземного водообмена Каспия обеспечивали по грубым оценкам слой воды, в зависимости от знака, 20±0,43 см.

### 5. Апробация результатов исследований

Выполним сравнение оценок среднегодового подземного водообмена Каспия в аналогичными оценками для других акваторий. Следует отметить, что в 1939–1941 гг. в Каспии фиксировались условия системного изъятия подземных вод литосферой. В Куяльницком лимане в этот период уровень лимана поднялся примерно на 4 м. По мнению В. И. Носырева [12] водный баланс лимана может существенно зависеть от тектонического режима. В работе [13] указано что как и в Каспии, «в межгодовом масштабе корреляция между ходом уровня Куяльницкого лимана и количеством атмосферных осадков отсутствует». В 1939–1945 гг. уровень Хаджибейского, Куяльницкого и Тилигульского лиманов были синхронно аномально высокими [14].

В работе [8] показано, что экстремальные значения среднегодовой невязки водного баланса лимана составили слой воды +37,9 см и − 37,2 см, что превышает среднюю оценку годового притока в

лиман 10,3 см и среднюю оценку годового объема атмосферных осадков 32,2 см.

В 1986–1991 гг. суммарное изъятие подземных вод составило примерно 88,9 см. За следующие три года подземное питание лимана составило 102,8 см. Полученные результаты о смене знака водообмена подземной гидросферы с лиманом полностью подтверждены результатами исследований профессора Е. А. Черкез [13].

Полученные результаты по Каспийскому морю и Куяльницкому лиману согласуются с результатами исследований среднегодового объема подземного водообмена в акватории Атлантического океана, полученной изотопными методами [15]. Полученная оценка соответствует слою воды в Атлантическом океане, толщиной 20 см.

### 6. Выводы

В результате исследования соответствия 60-ти летнего временного ряда среднегодовых невязок водного баланса Каспийского моря нормальному закону распределения случайных величин установлено, что средняя невязка не равна нулю, оценка среднего значения не равна моде и медиане, ряд невязок имеет многомодальное распределение, характеризуется наличием тренда и периодической составляющей. В уравнении водного баланса единственным не учтенным фактором был подземный водообмен. Учитывая теоретическую ошибку решения уравнения водного баланса показано, что экстремальные значения подземного водообмена в зависимости от знака составляли  $20 \pm 0,43$  см. Экстремальные оценки подземного водообмена Каспийского моря, Куяльницкого лимана имеют один порядок величин (примерно слой воды толщиной 20–35 см). Полученные результаты по Каспийскому морю и Куяльницкому лиману согласуются с оценками среднегодового объема подземного водообмена в акватории Атлантического океана, полученной изотопными методами. Количественные оценки объемов подземного водообмена подтверждают мнение академика Е. Ф. Шнюкова о существенном влиянии субмаринной разгрузки на формирование водных масс океанов и морей.

### Литература

1. Зеленов, К. К. Влияние современного подводного вулканизма на химию вод океана [Текст] / К. К. Зеленов, В. Н. Иваненков // Известия высших учебных заведений. «Геология и разведка». – 1982. – № 11. – С. 3–25.
2. Шнюков, Е. Ф. Исследования в подводных каньонах как новый метод поисков субмаринных источников [Текст] / Е. Ф. Шнюков, С. А. Клещенко, Л. И. Митин // Геологический журнал. – 1989. – Т. 49, № 6. – С. 63–73.
3. Юровский, Ю. Г. Подземные воды шельфа. Задачи и методы изучения [Текст]: монография / Ю. Г. Юровский. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. – 260 с.
4. Зекцер, И. С. Подземный водообмен суши и моря [Текст] / И. С. Зекцер, Р. Г. Джамалов, А. В. Месхетели. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 208 с.
5. Шило, Н. А. Природа колебаний уровня Каспия [Текст] / Н. А. Шило // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 305, № 2. – С. 412–416.
6. Шило, Н. А. Взаимосвязь колебаний уровня Каспийского моря с напряжениями в земной коре [Текст] /

Н. А. Шило, М. И. Кривошей // Вестник АН СССР. – 1989. – № 6. – С. 83–90.

7. Вайновский, П. А. Методы обработки и анализа океанологической информации. Одномерный анализ [Текст]: уч. пос. / П. А. Вайновский, В. Н. Малинин. – Л.: ГМИ, 1991. – 136 с.

8. Михайлов, В. И. Взаимодействие в системе Литосфера – Гидросфера [Текст]: монография / В. И. Михайлов, А. Б. Капочкина, Б. Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2010. – 153 с.

9. Михайлов, В. Н. Загадки Каспийского моря [Текст] / В. Н. Михайлов // Соросовский Образовательный журнал «Наука о Земле». – 2000. – № 4. – С. 63–70.

10. Голубов, Б. Н. Проявления флюидодинамики недр в Каспийском море по данным аэрокосмических наблюдений и геолого-геофизических исследований [Текст]: матер. XVIII Межд. науч. конф. / Б. Н. Голубов, А. Ю. Иванов // Конференция по морской геологии. – М., 2009. – С. 305–309.

11. Голубов, Б. Н. Соотношение природных и техногенных факторов эволюции подземной связи вод Аральского и Каспийского морей [Текст]: матер. XVIII межд. науч. конф. / Б. Н. Голубов // Геология морей и океанов. – М., 2009. – С. 302–305.

12. Колесникова, А. А. Циклический характер изменчивости гидролого-гидрохимических параметров Куяльницкого лимана (Северное Причерноморье) [Текст] / А. А. Колесникова, В. И. Носырев, В. И. Шмуратко // Доповіді Національної академії наук України. – 1997. – № 8. – С. 123–128.

13. Черкез, Е. А. Ротационно-фильтрационная модель водного баланса Куяльницкого лимана и История изучения и проблемы динамики уровня Куяльницкого лимана [Текст] / Е. А. Черкез, В. И. Шмуратко, О. А. Вахрушев // Лиманы С-3 Причерноморья; актуальные гидроэкологические проблемы и пути их решения. – Одесса: ТЕС, 2012. – С. 47–51.

14. Розенгурт, М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов [Текст] / М. Ш. Розенгурт. – К.: Наукова думка, 1974. – 225 с.

15. Moore, W. S. Submarine groundwater discharge revealed by  $^{228}\text{Ra}$  distribution in the upper Atlantic Ocean [Text] / W. S. Moore, J. L. Sarmiento, R. M. Key // Nature Geoscience. – 2008. – Vol. 1, Issue 5. – P. 309–311. doi: 10.1038/ngeo183

### References

1. Zelenov, K. K., Ivanenkov, V. N. (1982). The influence of the modern submarine volcanism in the chemistry of the ocean. Proceedings of the higher educational institutions. "Geology and Prospecting", 11, 3–25.
2. Shnyukov, E. F., Kleshchenko, S. A., Mitin, L. I. (1989). Research in underwater canyons as a new method of searching submarine sources. Geological Journal, 49 (6), 63–73.
3. Yurovsky, J. G. (2013). Groundwater shelf., Tasks and methods of study. Simferopol: DIAYPI, 260.
4. Zektser, I. S., Dzhamalov, R. G., Meskheteli, A. V. (1984). Underground water exchange of land and sea. Lviv: Gidrometeoizdat, 208.
5. Shilo, N. A. (1989). The nature of the Caspian Sea level fluctuations. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 305 (2), 412–416.
6. Shilo, N. A., Krivoshey, M. I. (1989). Relationship Caspian Sea level fluctuations with the stresses in the crust. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, 6, 83–90.
7. Vaynovsky, P. A., Malinin, V. N. (1991). Methods of processing and analyzing oceanographic information. Univariate analysis. Lviv: GMI, 136.

8. Mikhaylov, V. I., Kapochkina, A. B., Kapochkin, B. B. (2010). Interaction in the lithosphere – hydrosphere. Odessa: Astroprint, 153.

9. Mikhailov, V. I. (2000). Riddles of the Caspian Sea. Soros Educational Journal "Earth Science", 4, 63–70.

10. Golubov, B. N., Ivanov, A. Y. (2009). Manifestations of subsurface fluid dynamics in the Caspian Sea according to aerospace observations and geological and geophysical studies. Materials XVIII International Scientific Conference on Marine Geology. Moscow, 305–309.

11. Golubov, B. N. (2009). The proportion of natural and man-made factors, the evolution of the underground connection of the Aral and Caspian Seas. Materials XVIII International Scientific. Conf. Marine Geology. "Geology of the oceans and seas." Moscow, 302–305.

12. Kolesnikova, A. A., Nosyrev, V. I., Shmuratko, V. I. (1997). The cyclical nature of the variability of hydrological

and hydrochemical parameters Kuyal'nitskiy estuary (Northern Black Sea Coast). Reports of Academy of Sciences of Ukraine Natsionalnoi, 8, 123–128.

13. Cherkez, E. A., Shmuratko, V. I., Vahrushev, O. A. (2012). Rotary – filtration model of the water balance Kuyal'nitskiy estuary and studying history and problems of dynamics of the estuary Kuyal'nitskiy. Limani NW Black Sea; current hydroecological problems and their solutions. Odessa: TEC, 47–51.

14. Rozengurt, M. Sh. (1974). Hydrology and perspectives reconstruction of natural resources Odessa estuaries. Kiev: Naukova Dumka, 225.

15. Moore, W. S., Sarmiento, J. L., Key, R. M. (2008). Submarine groundwater discharge revealed by 228Ra distribution in the upper Atlantic Ocean. Nature Geoscience, 1 (5), 309–311. doi:10.1038/ngeo183

*Дата надходження рукопису 27.01.2015*

**Капочкіна Анастасія Борисівна**, магістр океанолог, Державна екологічна інспекція Північно-Західного регіону Чорного моря, 12 лінія 6 станції Люстдорфської дороги, 22, м. Одеса, Україна, 65114  
E-mail: nastia-82@mail.ru

**Міхайлов Валерій Іванович**, доктор географічних наук, старший науковий співробітник, кафедра автоматизації технологічних процесів, Одеська національна академія зв'язку ім. А. А. Попова, вул. Кузнечна, 1, м. Одеса, Україна, 65029  
E-mail: tsb1@mail.ru

**Кучеренко Наталія Василівна**, кандидат географічних наук, доцент, кафедра океанології та морського природокористування, Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська 15, м. Одеса, Україна, 65016  
E-mail: : natalia\_v\_kucherenkotsb1@ukr.net