

УДК 551.465

А.Х. Дегтерев, В.И. Мордашев*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sevastopol.ua***ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ**

Рассмотрено влияние изменения скорости и размеров струи течения на положение уровня моря вблизи берега. В геострофическом приближении анализируется эффект искривления поверхности моря в районе интенсивного течения. Получена численная оценка соответствующего подъема уровня на периферии течения для Черного моря. Показано, что изменение скорости и ширины течения приводят к изменениям уровня вблизи берега до 10...20 см при неизменном водном балансе. Сделан вывод, что колебания уровня, регистрируемые на береговых постах наблюдений, в значительной мере могут объясняться изменчивостью параметров Черноморского течения.

В связи с глобальным потеплением климата одной из основных угроз в причерноморском регионе является возможное затопление прибрежных территорий. Это обуславливает актуальность мониторинга динамики уровня моря и теоретического исследования факторов, оказывающих на него влияния. Для прогнозирования темпов наступления моря на сушу необходимы количественные оценки воздействия различных параметров на уровень моря в данном месте побережья.

В последние годы данные наблюдений на береговых постах свидетельствуют о заметном повышении уровня Черного моря. Обычно этот эффект связывают с подъемом уровня Мирового океана вследствие глобального потепления или с опусканием берегов Черного моря из-за тектонических процессов [1, 2]. Однако Черное море является одним из наиболее слабо связанных с океаном внутренних морей [3] и, как видно из рисунка 1, даже после осреднения с периодом 3 года изменение его уровня отличается сильной межгодовой изменчивостью с амплитудой до 20 см. В то же время для океана характерен почти монотонный подъем уровня на 10 см за последние 50 лет [4]. Причем даже средний многолетний уровень разных внутренних морей сильно отличается друг от друга – в Черном море он на 30 см ниже, чем в Балтийском море и на 28 м выше, чем в Каспийском море.

Количество воды в море определяется его собственным водным балансом, который зависит от стока рек, водообмена через Босфор, от атмосферных осадков и испарения с поверхности моря. Таким образом, уровень моря в основном определяется региональными факторами, в первую очередь гидрометеоусловиями на площади водосбора рек, впадающих в Черное море [5]. Это особенно очевидно на примере Каспийского моря, уровень которого в последние десятилетия поднимается на 10–15 см в год [6]. Тем более, что Черное море находится в переходной зоне между аридными и гумидными областями, для которой характерны большие флуктуации влажности, а значит и стока рек [7]. Что же касается тектонических движений, то в районе Средиземноморского пояса они чаще проявляются в виде отдельных землетрясений, нежели как постепенное погружение континентальной плиты [8]. Целью данного исследования является изучение эффекта наклона поверхности воды в районе течения, позволяющего объяснить наблюдающуюся тенденцию изменения уровня моря за последние десятилетия.

Обычно изменение уровня моря ассоциируется с увеличением или уменьшением количества воды в нем. В простейшем случае при небольших изменениях уровня (например, не более 0,2...0,5 м) можно пренебречь изменением площади водной поверхности S и тогда динамика изменения уровня воды в море h описывается уравнением водного баланса, имеющего смысл закона сохранения общего количества воды в системе море – атмосфера – реки [3]

$$dh/dt = (P - E) + R/S, \quad (1)$$

где t – время; $P(t)$ и $E(t)$ – осадки и испарение, выраженные в толщине слоя воды; $R(t)$ – поступление воды через проливы и в виде речного стока. Соответствующие функции времени в правой части уравнения задаются по данным измерений. В такой постановке задачи уровень стабилизируется за счет изменения обмена через проливы, поскольку соответствующий водообмен, очевидно, регулируется перепадом уровня воды в проливе (в первую очередь в Босфоре). При больших изменениях уровня следует учитывать и изменение S , которое, как видно из (1), играет роль обратной связи, уменьшающей воздействие на систему. Действительно, при подъеме уровня S увеличивается, что ведет к уменьшению правой части уравнения. Однако и в этом случае уравнение (1) описывает только часть процессов, влияющих на уровень воды вблизи берега. Существуют еще и деформационные изменения уровня,

которые, вообще говоря, не связаны с составляющими водного баланса моря. Это, например, волны на поверхности моря, как бегущие, так и стоячие. Кроме того, поверхность моря может искривляться под действием течений.

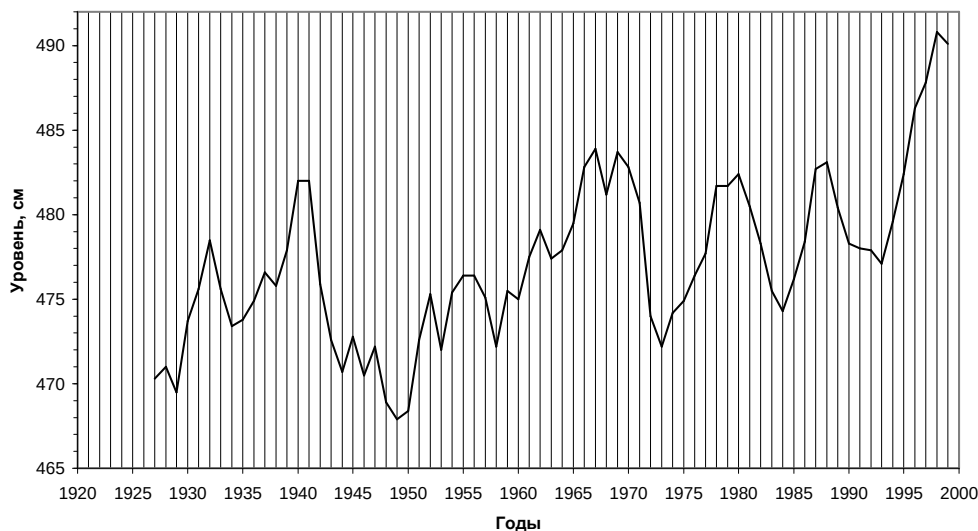


Рисунок 1 – Изменение среднегодового уровня Черного моря после осреднения скользящим средним с периодом 3 года

В последние годы в ряде работ [7] обращается внимание на то обстоятельство, что в конце 80-х–начале 90-х годов двадцатого века отмечалась заметная интенсификация Основного Черноморского течения (ОЧТ). Поскольку по срокам это совпадает с наблюдаемым на береговых постах подъемом уровня моря, можно предположить, что эти явления взаимосвязаны. И действительно, геострофическая теория течений дает простое объяснение такой связи. Ведь приборы для измерения уровня моря (мареографы, мерные рейки) установлены вблизи берега моря, а значит на периферии ОЧТ. С учетом циклонического характера движения воды в течении (против часовой стрелки, если смотреть по карте), оно должно приводить к образованию наклона уровня в зоне течения. Причем на периферии течения, то есть у берега, уровень воды должен быть в этом случае выше, чем мористее, чтобы горизонтальный градиент давления компенсировал влияние силы Кориолиса. Таким образом, на вертикальном разрезе поверхность воды вблизи берегов приподнята, и ее форма напоминает блюдце. Ясно, что изменение интенсивности течения будет влиять на наклон поверхности, а значит и на высоту уровня воды у берега. Но тогда и показания измерительных приборов вблизи берега будут соответствовать положению именно этих краев, а не среднему уровню моря, т.е., по сути, они фиксируют в значительной степени динамический эффект, а не реальные изменения количества воды в море. При этом показания мареографов и мерных реек зависят не столько от компонент водного баланса моря, сколько от интенсивности ОЧТ. Последняя же может меняться не только в связи с изменением речного стока, но и, например, под действием ветра или при перестройке распределения температуры и солености морской воды [5]. Эти качественные рассуждения показывают, что течение может влиять на измеряемый уровень моря.

Чтобы количественно оценить этот эффект, рассмотрим для определенности проходящее вблизи южного берега Крыма течение. Для простоты будем считать, что оно представляет собой однородную по сечению структуру шириной d , в которой вода движется с одинаковой скоростью v с востока на запад. В декартовой системе координат с осью x , направленной на восток, осью y – на север и осью z – вглубь моря (рисунок 2) запишем уравнение установившегося движения воды. В соответствии с теорией геострофических течений в стационарном режиме возникает наклон поверхности воды в такую сторону, чтобы сила Кориолиса компенсировала возникающий при этом горизонтальный градиент давления. При этом движение воды считается установившимся и пренебрегаем ее вязкостью. Последнее в частности означает, что не учитывается трение воды о дно, что в данном случае вполне оправдано; глубина моря в зоне ОЧТ превышает 100 м, тогда как так называемая глубина трения, при которой у поверхности еще сказывается трение о дно, составляет обычно 20...30 м [3].

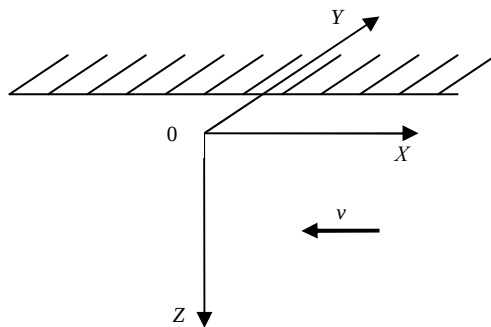


Рисунок 2 – Схема течения в декартовой системе координат

Таким образом, в данном случае можно использовать уравнение Эйлера для идеальной жидкости, дополненное силой тяжести и силой Кориолиса. В покомпонентной форме оно принимает вид [3]

$$\partial p / \partial y = 2\omega v \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\partial p / \partial z = g \rho,$$

где p – давление в воде; ρ – плотность воды; ω – угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси; φ – широта места; g – ускорение свободного падения и ось y соответствует направлению к берегу. В этом случае поверхность воды в плоскости yz наклонена под углом β к горизонтали, причем:

$$\operatorname{tg} \beta = \partial p / \partial y / \partial p / \partial z. \quad (3)$$

Это условие непосредственно следует из баланса сил в любой точке наклонной плоскости. Подставив сюда выражения (2), получим:

$$\operatorname{tg} \beta = 2\omega v \sin \varphi / g. \quad (4)$$

В свою очередь, образовавшийся наклон уровня приведет к перепаду уровней по обе стороны течения, равному $d \operatorname{tg} \beta$, что с точки зрения показаний береговых измерителей может трактоваться как подъем уровня моря на величину h :

$$h = 2\omega v d \sin \varphi / g. \quad (5)$$

Следует отметить, что эта величина пропорциональна произведению vd , то есть по сути интенсивности поверхностного течения, суммарному потоку воды. Поэтому при увеличении расхода течения в 2...3 раза, что характерно для изменчивости ОЧТ, динамический подъем уровня вблизи берега также увеличивается в 2-3 раза. Оценим абсолютную величину такого подъема уровня, взяв $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\varphi = 44^\circ$ с.ш., и характерные для ОЧТ значения $d = 50$ км, $v = 30$ см/с [5]. При этом $\operatorname{tg} \beta = 3 \cdot 10^{-6}$ и $h = 15$ см. Заметим, что межгодовая и сезонная изменчивость уровня Черного моря по данным измерений обычно не превышает 20 см (рисунок 1), так что полученная оценка свидетельствует о большом значении рассмотренного эффекта. Даже при Ялтинском землетрясении 12 сентября 1927 г. высота цунами в Севастополе не превышала 23 см. Таким образом, рассмотренный эффект вполне может объяснить значительную часть дисперсии колебаний уровня моря, например, вблизи Ялты.

В то же время различия в параметрах течения вдоль берегов Черного моря вполне может приводить в соответствии с (5) к разным значениям h и dh/dt в разных пунктах наблюдения. Даже при условии сохранения постоянного расхода вдоль всего течения (что не обязательно в связи с образованием вихрей и меандров), произведение vd может варьировать в связи с разной глубиной, на которую проникает течение. На сегодняшний день различия в тенденциях изменения уровня в разных точках побережья Черного моря объясняют разной скоростью тектонических движений самих берегов. Например, в Севастополе уровень в среднем поднимается на 2,5 мм в год, а в Одессе – на 3,7 мм [1]. Примечательно, что именно в Поти (кавказское побережье) отмечается наибольшая тенденция повышения уровня моря (соответствующая опусканию берегов по этой теории), достигающая 1 см/год [9]. С другой стороны, именно вблизи Кавказского побережья с начала 90-х годов фиксируется усиление струи ОЧТ в 3 раза по сравнению со средним за период наблюдений значением [7]. Таким образом, усиление течения тоже может быть причиной подъема уровня у берега наряду с другими факторами (опускание самого берега, увеличение водного баланса моря).

Полученные нами оценки позволяют сделать вывод, что эффект динамического изменения уровня моря у берега достаточно велик и должен учитываться при обработке данных измерений на береговых постах. Динамика уровня моря вблизи берега неоднозначно связана с изменением уровня на большей части акватории моря.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с проведением экспериментальных работ. Это может быть, например, сопоставление данных по уровню Черного моря (как спутниковых, так и береговых) с результатами прямых измерений параметров основной струи ОЧТ. Возможны и дальнейшие теоретические исследования рассмотренного нами эффекта с учетом неоднородности распределения скорости течения в струе на основе данных измерений как вблизи разных береговых пунктов, так и в разные сезоны. Пока прямое подтверждение эффекта «кажущегося» повышения уровня всего Черного моря осложняется отсутствием регулярной информации, в том числе о параметрах ОЧТ, хотя сам эффект искривления поверхности моря вблизи берега хорошо проявляется при анализе данных спутниковых альтиметров. Большой объем данных измерений накоплен о сезонных и многолетних колебаниях уровня моря в ряде черноморских портов [1], что позволяет судить в частности о топографии поверхности моря в разное время года.

Библиографический список

1. Горячкин Ю.Н. Современные изменения уровня Черного моря / Ю.Н. Горячкин, В.А. Иванов // Водные ресурсы. — 1996. — Т. 23. — № 2. — С. 246–248.
2. Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales / A.B. Kara, H.E. Hurlburt, A.J. Wallcraft, M.A. Bourassa // Journal of Climate. — 2005. — V. 18. — № 24. — P. 5266–5293.
3. Доронин Ю.П. Региональная океанология / Ю.П. Доронин. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 173 с.
4. Anadon F. Impacts of Climate Change on the European Marine and coastal Environment / F. Anadon, [et al.] // Marine Board Position Paper 9. — Strusbourg: ESF, 2007. — 83 p.
5. Зац В.И. Гидрометеорологический режим южного берега Крыма / В.И. Зац, О.Я. Лукьяненко, Г.В. Яцкевич. — Л.: Гидрометеиздат, 1960. — 120 с.
6. Бабаев А.Г. Природопользование в регионе Каспийского моря / А.Г. Бабаев, И.С. Зонн // Вестник РАН. — 2005. — Т. 78. — № 8. — С. 715–719.
7. Vinogradov M.E. Long-term variability of the pelagic community structure in the open Black Sea / M.E. Vinogradov // Problems of the Black Sea. — Sevastopol: MHI UAS, 1992. — P. 19–33.
8. Муратов М.В. Происхождение материков и океанических впадин / М.В. Муратов. — М.: Наука, 1975. — 176 с.
9. Баренбейм Д.Я. Многолетние колебания уровня Черного моря и речной сток / Д.Я. Баренбейм // Метеорология и гидрология. — 1959. — № 1. — С. 44–46.

Поступила в редакцию 2.03.2009 г.