

Э.Н.Михайлова, Н.Б.Шапиро

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ
В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ
ВО ВРЕМЯ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ (ВЕСНА 1997 г.)**

Обсуждаются результаты численного эксперимента по моделированию трансформации поля солёности в Севастопольской бухте во время интенсивного половодья весной 1997 г. В расчёте использовались реальные данные о скорости и направлении ветра, температуре поверхности моря, расходе р.Черной. Показано, что в начальной стадии увеличения пресноводного стока происходило ускоренное распределение морской воды, средняя солёность в бухте уменьшилась примерно на 3,5 ‰. Когда распределённые воды заполнили практически всю бухту, процесс распределения резко замедлился и сменился практически таким же интенсивным осолонением. В результате средняя солёность в бухте снова возросла почти на 3 ‰. При этом процесс распределения завершился до окончания половодья р.Черная, а именно после достижения им своего пика.

Гидрологическая структура вод в прибрежных районах во многом связана с наличием речного стока. Особенно это относится к водоемам эстуарного типа, имеющих ограниченный водообмен с открытым морем, ярким примером которых является Севастопольская бухта. В этом районе негативное влияние на экологическую ситуацию бухты оказывают стоки промышленных и коммунальных предприятий города, стоки с различных гражданских и военных судов, выбросы загрязняющих веществ в море при аварийных ситуациях. Поэтому становится ясной необходимость мероприятий, направленных на улучшение состояния морской экосистемы данного региона. Успешное проведение этих мероприятий возможно лишь при наличии соответствующего теоретического обоснования. В связи с этим весьма актуальным является разработка моделей переноса и трансформации загрязняющих веществ под действием гидродинамических, физико-химических и биологических факторов в этом районе моря.

Главной составляющей такой модели является гидродинамический блок, описывающий трехмерную циркуляцию в рассматриваемом регионе. Для исследования пространственной структуры циркуляции и трансформации теплового и солевого режимов Севастопольской бухты была адаптирована трехмерная многоуровневая модель, основанная на так называемых примитивных уравнениях гидродинамики моря, т.е. на нелинейных уравнениях в приближениях Буссинеска и гидростатики [1]. Существенной особенностью модели является то, что в граничных условиях используются данные, полученные в комплексных исследованиях, проведенных в бухте в 1997 – 1999 гг. [2, 3]. Это данные об атмосферных факторах (температуре воздуха, скорости и направления ветра, осадках и т.п.), поверхностной температуре воды и уровне моря, полученные на ГМС «Севастополь», распо-

ложенной в «центре» бухты на м.Павловский, а также данные о расходах втекающей в бухту р.Черной (ежесуточные). Кроме этого, проводились ежемесячные измерения температуры и солености на семи гидрологических станциях разреза от вершинной части бухты (вблизи устья р.Черной) до выхода из бухты (пролива).

На поверхности моря задаются не меняющиеся по горизонтали тангенциальное напряжение ветра, рассчитанное по наблюдаемой скорости ветра, и наблюдаемая температура воды. Задание поверхностной температуры, а не расчет ее с помощью условия теплового баланса, как это делалось в «одномерной» модели [4], делается для упрощения расчетов и из-за сложности подбора параметров в полуэмпирических формулах для компонент потока тепла на поверхности моря. Также для упрощения задачи в данном расчете не учитываются потоки массы через поверхность моря, связанные с осадками и испарением (из-за их относительной малости [2, 3]), и принимается условие отсутствия потока соли. Выполняется, разумеется, кинематическое условие, т.е. поверхность моря является поверхностью тока, но приближение твердой крышки при этом не используется.

На дне принимаются условия обтекания с трением (с квадратичной зависимостью от придонной скорости течения) и отсутствия нормальных потоков тепла и соли.

На боковых твердых границах задаются условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. На открытых боковых границах скорости течения задаются (устье р.Черная) или отдельно рассчитываются (пролив, отделяющий бухту от открытого моря), задаются также температура и соленость втекающей в бухту воды; вытекает из бухты вода со своей температурой и соленостью.

В устье р.Черная скорость втекания задается постоянной по глубине, соленость берется равной нулю. Температура воды в р.Черная берется постоянной по глубине и рассчитывается в зависимости от разности между температурой воздуха над бухтой и температурой воды на поверхности. Если эта разность по модулю не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, то температура берется равной поверхностной температуре. Если разность больше $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воды в реке принимается на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше поверхностной температуры моря и, наоборот, на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, если разность меньше $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На жидкой границе в проливе сначала (на каждом шаге по времени) вычисляется интегральный расход воды через пролив нормальный к границе, как балансирующий расход р.Черной и изменение объема воды в бухте во времени. Осадки и испарение из-за их относительной малости [2, 3], как отмечалось выше, при этом не учитываются. Изменение объема воды в бухте вычисляется по изменению среднего по площади уровня моря, в качестве которого используется уровень, измеренный на ГМС «Севастополь» на м.Павловский. При этом предполагается, что изменения уровня по горизонтали малы [1] и существенно меньше изменения по времени. Касательная компонента интегрального расхода полагается равной нулю. Далее вычисляется баротропная (средняя по глубине) скорость течения, которая предполагается не меняющейся по сечению пролива. После этого рассчитываются вертикальный профиль скорости течения на отдельных горизонтах. Для этого используется условие равенства нулю производной по нормали к гра-

нице от бароклинических компонент (отклонений от баротропной скорости) скорости течения. Подчеркнем, что задание баротропной компоненты скорости течения на открытой жидкой границе с учетом известного из наблюдений среднего уровня является спецификой постановки данной задачи.

Вертикальный профиль температуры воды в проливе со стороны открытого моря (температура также принимается не меняющейся по сечению пролива) рассчитывается отдельно с помощью локально-одномерной модели (изменение температуры по времени балансируется только вертикальной диффузией тепла) с заданной на поверхности изменяющейся со временем температурой воды и равным нулю потоком тепла через дно моря. При этом поверхностная температура воды в открытом море берется такой же, как и внутри бухты. Соленость в открытом море вне пролива задается постоянной величиной и равной 18 ‰. Именно с такой соленостью всегда втекает морская вода в бухту.

В начальный момент времени (0 часов 1 января 1997 г.) течения во всей области отсутствуют, температура и соленость постоянные и равны 8 °С и 17,9 ‰ соответственно. Отметим, что используемые в расчете данные наблюдений меняются скачком через 6 ч или через сутки, в зависимости частоты измерений.

Моделируется район Севастопольской бухты к востоку от пролива (входа в бухту) до устья р.Черной с реальной топографией дна и конфигурацией берегов. Область разбита на боксы, горизонтальные размеры которых составляют 62,5 м по долготе и широте. По вертикали сетка неравномерная. Горизонтальные составляющие скорости течения, температура и соленость рассчитываются на 12 горизонтах: 0,25; 0,75; 1,25; 1,75; 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 16,5 м. Вертикальная составляющая скорости течения рассчитывается посередине между указанными горизонтами. Минимальная глубина моря принимается 1,3 м.

В [1] описаны полученные с помощью этой модели результаты численного эксперимента по расчету циркуляции и термохалинных полей в январе – феврале 1997 г. Эксперименты показали, что для получения реальных результатов и для того, чтобы конечно-разностная схема получалась устойчивой, важен выбор коэффициентов турбулентного обмена. В результате коэффициент вертикального обмена количеством движения A_z (см²/с) задавался переменным по горизонтали и пропорциональным скорости ветра и глубине моря по формуле $A_z = 0,54HW$, где H – глубина моря (м), W – скорость ветра (м/с). Эта формула получается с помощью теории размерностей в модели «мелкого моря» [5], когда пренебрегается влиянием силы Кориолиса из-за мелководности акватории. Коэффициент горизонтальной вязкости A_l принимался постоянным, достаточно малым и равным $A_l = 10^2$ см²/с. Коэффициенты вертикальной диффузии тепла и соли брались одинаковыми, постоянными и равными $\mu = 1$ см²/с, коэффициенты горизонтальной диффузии принимались вообще равными нулю.

Анализ результатов расчета показал, что в зимний сезон эволюция циркуляции и сопутствующая перестройка гидрологических полей (в основном, поля солености, температура меняется несущественно) в первую очередь связана с действием ветра, существенно зависит от его направления, интенсивностью и изменчивости по времени.

В то же время важным фактором, определяющим гидрологическую структуру воды в Севастопольской бухте, является сток пресных вод р.Черной в восточной части бухты и приток соленых морских вод через пролив в ее западной части. Расчеты показали, что в зимний сезон даже умеренный пресноводный сток значительно влияет на вертикальную структуру гидрологических полей. За счет распреснения поверхностных вод возникает достаточно большой вертикальный градиент солености (и вертикальный градиент плотности) в верхнем слое моря, так что выхолаживание моря не приводит к возникновению конвекции, а образуется инверсия температуры, то есть более теплая вода располагается в глубинных слоях у дна.

Логическим продолжением работы по разработке математической прогностической модели циркуляции в Севастопольской бухте, позволяющей количественно точно воспроизводить реальную трехмерную структуру гидрофизических полей в море по известным из наблюдений внешним воздействиям, является проверка модели на ее способность описать процесс интенсивного половодья, которое наблюдалось весной 1997 г. с 20 марта до 1 мая; пик 16 апреля. Половодье проявлялось в резком увеличении расхода р.Черной. С этой целью численный эксперимент по расчету эволюции термохалинных полей в бухте, описанный в [1], был продолжен до 25 июня.

На рис.1, *a* представлены графики изменения по времени (рассчитанные по данным наблюдений с 15 января до 25 июня) расхода р.Черной U_R ($\text{м}^3/\text{с}$) и посуточно осредненного суммарного расхода воды U через пролив на входе в открытое море. Видно, что в промежуток времени примерно до 20 марта пресноводный сток р.Черной был довольно умеренным (менялся в пределах 1 – 1,5 $\text{м}^3/\text{с}$). В это же время перенос воды через пролив U , в основном обусловленный колебаниями среднего по площади уровня воды в бухте, менялся по величине и направлению. В промежуток времени, соответствующий половодью от 20 марта до первых дней мая, увеличивается пресноводный сток р.Черной и расход воды через пролив U по существу балансируется речным стоком, так что имеет место суммарный перенос в проливе, направленный из бухты в открытое море. Далее, при уменьшении расхода реки и его «возвращению» к прежнему «умеренному» состоянию, перенос воды через пролив вновь начинает меняться по направлению (и величине).

Также на рис.1, *a* приведены рассчитанные в численном эксперименте графики изменения по времени расходов ($\text{м}^3/\text{с}$) через сечение в проливе: «положительного» (кривая U^+)

$$U^+ = \iint (u_n + |u_n|) dl dz/2,$$

направленного в бухту течения, и «отрицательного» (кривая U^-)

$$U^- = \iint (u_n - |u_n|) dl dz/2,$$

направленного из бухты в открытое море течения. Здесь u_n – нормальная к границе компонента скорости течения; dl , dz – элемент границы. В большинстве случаев расходы U^+ , U^- превышают суммарный, интегральный расход $U = U^+ + U^-$, что свидетельствует об изменчивости скорости с глубиной. Можно отметить, что вертикальная изменчивость течений на входе в бухту усиливается во время половодья и наиболее интенсивна в период затухающей фазы половодья.

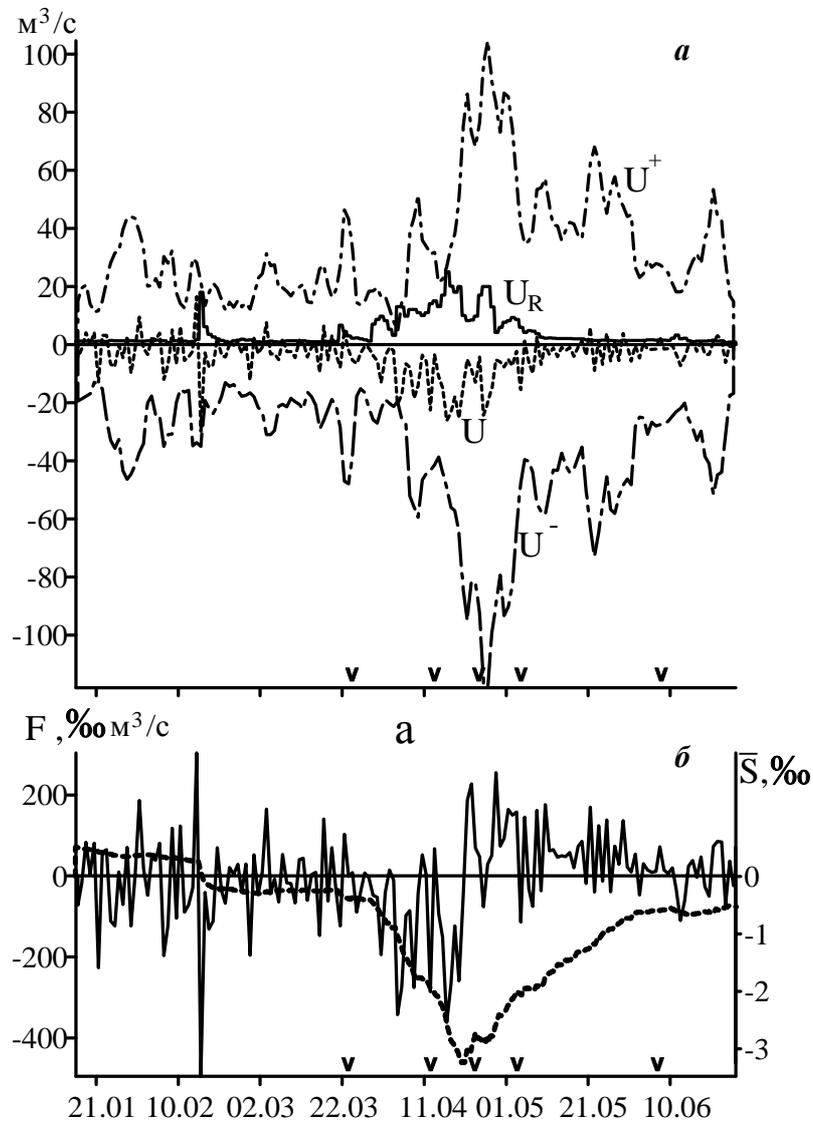


Рис. 1. Изменение по времени расхода р.Черной U_R , суммарного расхода воды U через пролив на входе в открытое море, расхода U^+ , направленного в бухту, и расхода U^- , направленного из бухты (а); расхода соли через пролив F (—) и отклонения от 17 ‰ средней солёности в бухте \bar{S} (- - -) (б).

На рис.1, б приведен рассчитанный по модели временной график расхода соли (посуточно осредненного) через пролив, соединяющий бухту с открытым морем. Этот расход вычисляется по формуле

$$F = \iint u_n S \, dl \, dz,$$

где S – солёность на открытой границе со стороны бухты.

Здесь же приведен временной ход средней по объёму солёности (точнее, отклонения от 17 ‰) в Севастопольской бухте, который, очевидно, свя-

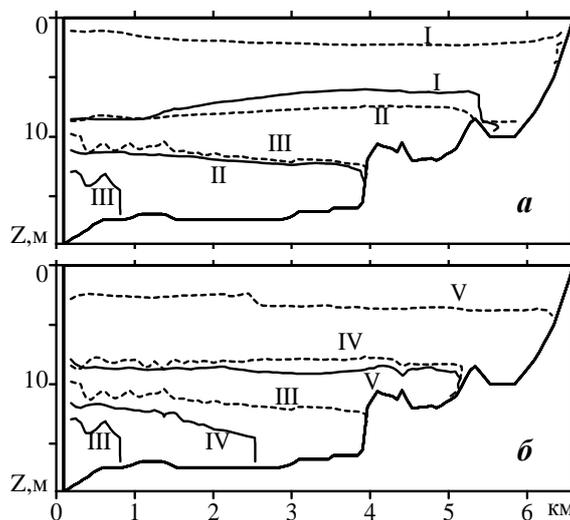
зан с потоком соли через пролив. По существу это баланс соли в бухте, так как с речными водами соль в бухту не поступает.

Видно, что в начальный период наблюдаются хаотические колебания в переносе соли через пролив в дамбе. В нарастающей фазе половодья происходит в основном вынос соли из бухты в открытое море. По достижении пика половодья возникает обратный перенос соли из моря в бухту. Он постепенно уменьшается с затуханием пресноводного стока р.Черной и снова наступает период хаотических колебаний в переносе соли через пролив в дамбе.

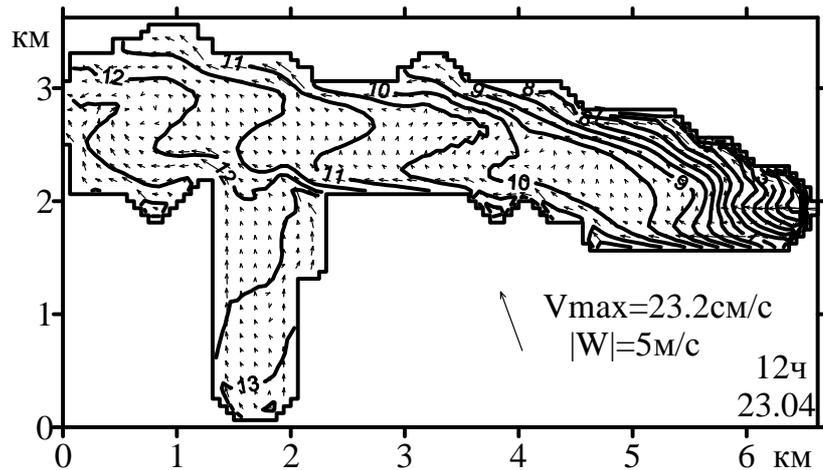
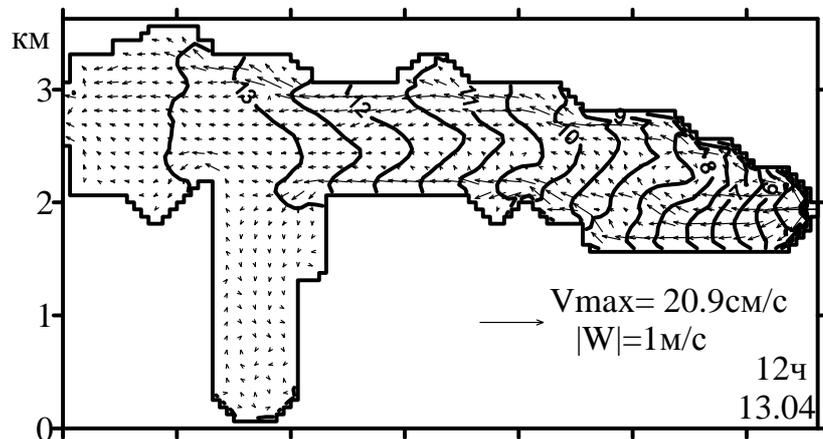
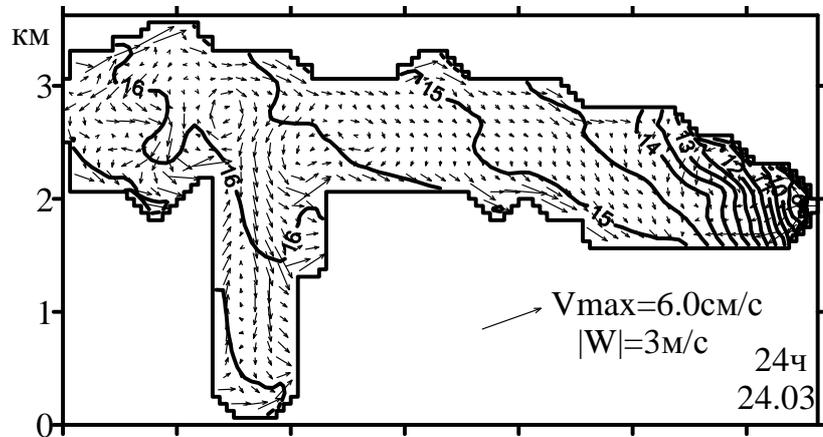
В начальный период умеренного пресноводного речного стока происходит слабое распреснение воды в бухте. Обратим внимание на то, что однократное усиление пресноводного стока, происшедшее 15 февраля, привело к относительному ускорению этого процесса распреснения. При нарастании поступления пресных вод, начиная с 22 марта, происходит ускоренное распреснение бухты. В целом за этот период средняя соленость в бухте уменьшается примерно на 3,5 ‰. Процесс распреснения резко замедляется 21 апреля и сменяется практически таким же интенсивным ростом солености воды в бухте. Этот процесс продолжается до 10 июня. В результате средняя соленость в бухте возрастает почти на 3 ‰ и устанавливается на уровне примерно 16,5 ‰. Отметим, что процесс распреснения бухты завершается до окончания процесса половодья реки Черная и, что еще более интересно, сразу после достижения им своего пика (16 апреля). По-видимому, это связано с усилением активности ветра над бухтой с 15 до 21 апреля.

Рост солености происходит при интенсификации «положительного» U^+ и «отрицательного» U^- потоков, т.е. при двухслойной структуре течений в проливе. Интенсивный обмен бухты с открытым морем тесно связан с процессом восстановления солености в бухте. В самом деле, вода, выносимая из бухты, более пресная, чем вода, приходящая из открытого моря. На графике потока солености можно видеть достаточно резкую смену знака, которая происходит между 20 и 21 апреля. Галочками на оси абсцисс отмечены моменты времени, в которые далее будет анализироваться пространственная структура поля солености.

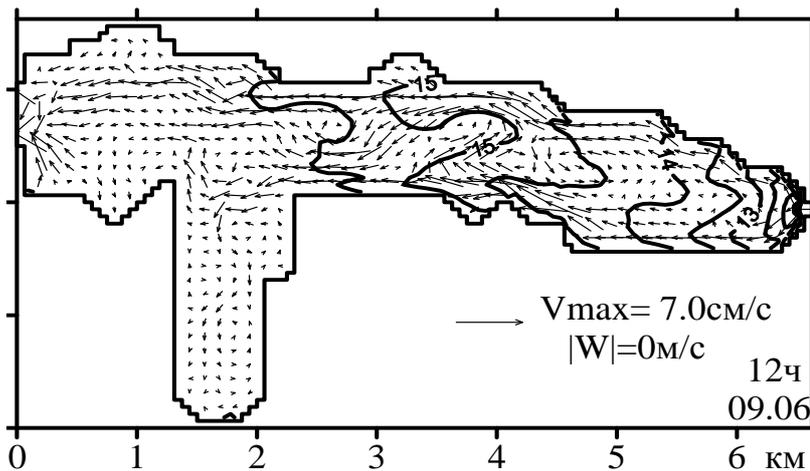
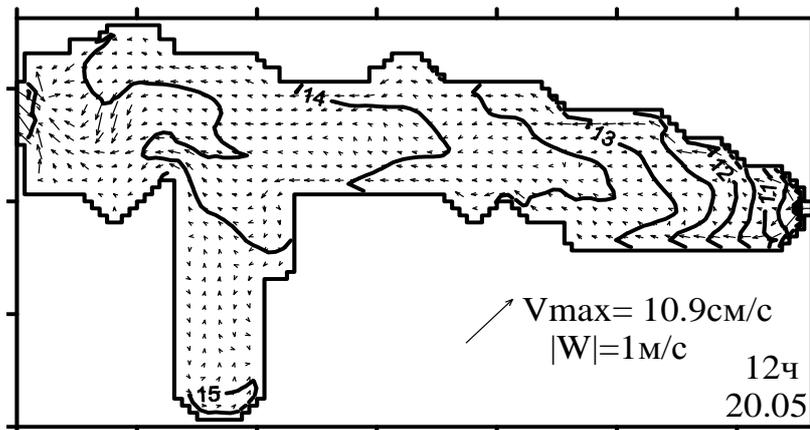
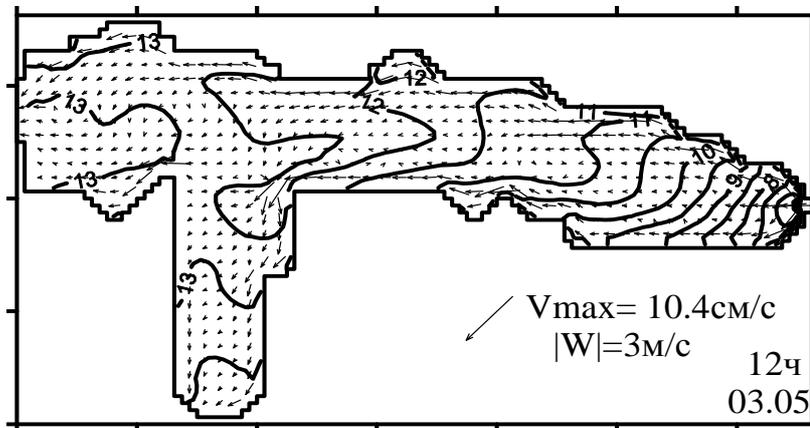
Представление о том, как происходит пространственная перестройка поля солености, дает рис.2. На рис.2, а приведены положения изопикн 16 и 17 ‰ на зонально-вертикальном разрезе вдоль оси бухты (от устья р.Черной на востоке до центральной части



Р и с . 2 . Положения изопикн 16 ‰ (- - -) и 17 ‰ (—) на разрезе вдоль оси бухты при распреснении (а) и осолонении (б); кривые соответствуют датам 24 марта (I), 13 апреля (II), 23 апреля (III), 3 мая (IV), 9 июня (V).



Р и с. 3. Распределения солёности и векторов скорости течения на поверхности нижнем углу приведены дата, значения скорости ветра $|W|$ и максимальной скорости ветра, длина задает масштаб максимальной скорости поверхностного течения.



моря во время половодья: 24 марта, 13 и 23 апреля, 3 и 20 мая, 9 июня. В правом
 скорости течения V_{max} и вектор, направление которого совпадает с направлением

пролива на западе) в процессе распреснения. Отметим, что в рассматриваемые моменты времени ветер был умеренным, не было резких вертикальных градиентов солености и больших наклонов изохалин в горизонтальных направлениях. Видно, что со временем в процессе распреснения происходит вытеснение поверхностными распресненными водами более соленых вод в глубинные слои бухты и в западном направлении, далее они выносятся через пролив в открытое море. На рис.2, б приведены положения этих изопокин при обратном процессе, т.е. при осолонении воды в бухте. Видно, что более соленая вода проникает в бухту из открытого моря и смещается вверх и к восточному краю; верхние более пресные воды выносятся через пролив в открытое море. В конце концов, происходит восстановление солености практически на уровне, который существовал до начала половодья.

Если на поле солености в целом влияет речной сток и водообмен с открытым морем, то на особенности его трехмерной структуры и на циркуляцию в бухте существенное влияние оказывает ветер. Это можно увидеть на рис.3, на котором представлены распределения солености и векторов скорости течения на поверхности моря в различные моменты, когда происходило половодье: 24 марта, 13 и 23 апреля, 3 и 20 мая, 9 июня. Видно, что в бухте на фоне достаточно медленного процесса распреснения и последующего осолонения воды наблюдается достаточно быстрая перестройка пространственной картины поля солености. При этом положение изолиний солености определяется в основном действием ветра, точнее, его направлением, что соответствует выводам, полученным в [1]. Так, можно отметить смещение более распресненных вод к северному берегу при ветрах с южной составляющей (дует с юга). И, наоборот, при ветрах с северной составляющей распресненные воды смещаются к южному берегу, при этом при наличии восточной составляющей возникает локальное пятно таких вод на выходе около Южной бухты. Это же можно сказать и о распределении течений.

Полученные результаты выглядят достаточно правдоподобными. К сожалению, отсутствуют данные наблюдений, с помощью которых можно было бы прокалибровать модель на ее способность описать реальную ситуацию в бухте в период половодья. Именно в рассматриваемый период времени непосредственных наблюдений в море не проводилось.

Однако результаты данного численного эксперимента хорошо согласуются с результатами численного эксперимента, выполненного в рамках упомянутой выше одномерной (горизонтально осредненной) многослойной квазиизопокикнической модели [4]. В обеих моделях получается практически одинаковое изменение солености в бухте.

Таким образом, процессы, происходящие в период интенсивного половодья, можно описать следующим образом. В начальный период распресненные воды сосредоточены в восточной части бухты и не участвуют в водообмене с открытым морем. Однако при этом усиливается вертикальная изменчивость течений в самой бухте и в проливе на выходе из бухты. Поступающие речные воды вытесняют более соленые воды в глубинные слои, при этом соленость на западном крае бухты и средняя соленость в бухте уменьшаются. В течение месяца (этот промежуток времени, по-видимому, зависит от интенсивности половодья) распресненные воды приближаются к

выходу из бухты. И в это время происходит перелом: процесс распреснения завершается и начинается восстановление солевого режима в бухте, поскольку вода, выносимая из бухты, гораздо менее соленая, чем вносимая из прилегающих районов моря. Можно отметить, что осолонение происходит независимо от продолжающегося преобладания выноса воды из бухты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // Морской гидрофизический журнал. (в печати)
2. *Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н., Романов А.С.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998 – 1999 гг.) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.– С.79-103.
3. *Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В., Романов А.С., Овсяный Е.И.* Влияние океанографических факторов на экосистему полузамкнутой антропогенно нагруженной Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал.– 2003.– 2.– С.66-80.
4. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Репетин Л.Н.* Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997 – 1999 гг. // Морской гидрофизический журнал.– 2003.– 4.– С.15-35.
5. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений.– М: Изд. АН СССР, 1960.– 128 с.

Материал поступил в редакцию 7.02.2005 г.