

Н.А.Стокозов

*Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь***МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ И БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТ**

Приведены, рассчитанные с помощью созданных моделей, морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт и их выделенных частей (объёмы слоев, планарные и поверхностные площади, площади разрезов, длины береговых и граничных линий). Полученные результаты позволяют специалистам различных областей рассчитывать запасы химических веществ в воде и донных отложениях бухт и проводить в дальнейшем, при определении потоков поступления и удаления веществ, оценки экологической ёмкости этих акваторий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, Севастопольская и Балаклавская бухты, морфометрия.*

Севастопольская бухта по своему геоморфологическому типу может быть отнесена к полузамкнутым акваториям эстуарного типа с затруднённым водообменом. Значительно затруднило водообмен бухты с открытым морем возведение в 70-х гг. прошлого века двух защитных молов, которые в три раза (с приблизительно 1200 м до 410 – 415 м) сузили вход в бухту. В результате водообмен бухты сократился на 40 – 70 % [1]. Бухта с глубинами от 20 до 4 – 5 м имеет длину около 7 км и ширину около 1 км в западной части. Берега бухты, особенно её южный берег, значительно изрезаны. В восточной кутовой части в бухту впадает река Чёрная. Её водосборный бассейн составляет 427 км², среднегодовой сток 56,8 млн. м³ (1954 – 2000 гг., створ с.Хмельницкое), 80 % стока приходится на зимний и весенний периоды (данные из [2]). Полузамкнутая Балаклавская бухта расположена в юго-восточной части Гераклейского п-ова и имеет длину (по тальвегу) приблизительно 1400 м и ширину 100 – 200 м. Глубины изменяются от 34 м на входе в бухту до 2 – 4 м в кутовой части.

Севастопольская и Балаклавская бухты на протяжении многих десятилетий подвержены интенсивному антропогенному воздействию в результате активного хозяйственного и военного использования. Основными источниками загрязнения бухт являются бытовые и промышленные стоки, ливневая канализация, сбросы с базирующихся судов, портовых сооружений и, в меньшей степени, сток р.Чёрная для Севастопольской бухты. По данным Государственной инспекции охраны Чёрного и Азовского морей в настоящее время в Севастопольской бухте насчитывается около 30 выпусков сточных вод. Ежегодный сброс в бухту сточных вод оценивается в 2 млн. м³, аварийные выпуски и ливневые стоки составляют еще около 1,5 млн. м³ (данные приведены в [2]). В Балаклаве отсутствует даже механическая очистка стоков и часть городской канализации из разрушенного "глубоководного" коллектора поступает в море у входа в бухту. С этими стоками в бухты в значительных количествах поступает весь спектр загрязняющих веществ – биогенные элементы, тяжелые металлы, нефтепродукты и хлорорганические соединения.

© Н.А.Стокозов, 2010

В последние два десятилетия, в связи с отсутствием государственного финансирования морских и океанических исследований, различным аспектам состояния экосистем севастопольских бухт уделяется определенное внимание [2 – 7]. Как показано в упомянутых выше работах, в Севастопольской бухте, в зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрии и гидрометеорологических условий, образуются как относительно "чистые" зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например Южная бухта).

Существующие работы могли бы быть существенно дополнены оценками запасов различных веществ в воде и донных отложениях бухт, которые бы позволили, при знании потоков их поступления и удаления, проводить оценки экологической ёмкости акватории с использованием, например, методов боксового моделирования [8, 9]. Для проведения таких оценок и моделирования необходимо на первом этапе работ знание морфометрических характеристик (объёмов слоев, планарных и поверхностных площадей, длины береговой линии) как отдельных выделенных частей, так и бухт в целом. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи на первом этапе работы было проведено сканирование морских навигационных карт (навигационных планов) масштабов 1:5000 и 1:1500 для Севастопольской и Балаклавской бухт, соответственно, издательства Главного управления навигации и океанографии МО РФ (издание 2005 г.) с коррекцией прямоугольности изображения с помощью программы *Adobe Photoshop 5.5*.

Полученные изображения в формате *.jpg импортировались в навигационную программу *Fugawi 3* для проведения их калибровки с заданием системы координат (Пулково-42), проекции Меркатора и координат углов изображения. При необходимости быстрого перехода от системы координат Пулково-42 к общепринятой в мире системе координат WGS-84 следует место на карте сместить на 1" к югу и на 5,6" к западу. Следует отметить, что на навигационных картах (планах) МО РФ указанных масштабов проекция вообще не указана, хотя понятно, что используется проекция Меркатора. Использование для калибровки различных видов проекции Меркатора (например, *Universal Transverse Mercator – UTM* или проекции Гаусса-Крюгера) приводило к абсолютно аналогичным результатам, что контролировалось координатным курсором при значительном увеличении изображения и объяснялось масштабом используемых планов. После калибровки изображений в программе *Fugawi 3* проводилось разбиение бухт на характерные части, руководствуясь морфометрией бухт с использованием имеющихся данных по загрязнению, скорости седиментации и типам донных отложений. Севастопольская бухта была разделена на пять частей, Балаклавская – на три части.

Следующим этапом работы являлось создание в программе *Fugawi 3* двух типов массивов данных (широта, долгота, глубина) – массива глубин и граничного массива для каждой выделенной части бухт. Для получения массива данных для каждой бухты в целом массивы глубин объединялись, а граничный массив формировался отдельно. Полученные массивы экспортировались из программы *Fugawi 3* в виде файлов *.txt. Общее количество отметок глубин составляло 2954 для Севастопольской и 2625 для Балаклав-

ской бухты. Кроме того, формировались массивы жидких границ (разрезов) выделенных частей (расстояние и глубина) с последующим расчетом их площадей в программе *SigmaPlot* 10.0.

Созданные *.txt файлы импортировались в программу *Surfer* 8 с сохранением в формате *.dat. Из граничных массивов формировались файлы *.bln. Для решения поставленной задачи был произведен пересчет широты и долготы в метрические единицы. Длина секунды дуги меридиана (L_m) и параллели (L_p) в метрах на широте φ в проекции Меркатора для эллипсоида Красовского рассчитывалась по формулам [10]:

$$L_m = (111,143 - 0,562 \cos 2\varphi)/3,6, \quad (1)$$

$$L_p = (111,321 \cos \varphi - 0,094 \cos 3\varphi)/3,6. \quad (2)$$

Длина секунды дуги меридиана и параллели составила для Севастопольской бухты 30,871 и 22,035 м соответственно, а для Балаклавской бухты 30,870 и 22,066 м. Полученные значения совпадали с прямыми измерениями на калиброванных навигационных картах в программе *Fugawi* 3, принимая во внимание толщину линий сетки при значительном увеличении и точность постановки измерительного маркера.

Для построения функций двух переменных (морфометрических моделей) в программе *Surfer* 8 был выбран один из методов так называемой "геометрической близости" – метод "естественного соседа" (*natural neighbor interpolation*), развитый Робертом Сибсоном [11]. Базовое уравнение метода для функции двух переменных имеет следующий вид:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, y_i), \quad (3)$$

где $F(x, y)$ – оценка для (x, y) ; n – количество ближайших соседних точек, используемых для интерполяции; $f(x_i, y_i)$ – известные значения (x_i, y_i) и w_i – веса, ассоциированные с $f(x_i, y_i)$. Метод основан на разбиении (мозаике) Вороного дискретного множества пространственных точек. Веса определяются из триангуляции Делоне [12]. Преимуществом этого метода по сравнению, например, с широко используемым статистическим методом *Kriging* является отсутствие излишних "биений" интерполяционной функции (иногда в отрицательную область), а также ограничение области построения "естественными" границами, а не прямоугольником, построенным на крайних точках области. Метод в идеале не экстраполирует изолинии вне области построения. Однако, это не всегда соблюдается для относительно сложных областей построения или для тех мест области построения, где реальная граница имеет сложный, извилистый вид. Пространственный шаг сетки подбирался экспериментально до получения неизменной картины изолиний (например, для всего массива данных Севастопольской бухты он составил приблизительно 7×7 м). Далее, в программе *Surfer* 8 выполнялся (после ограничения области построения файлом *.bln) расчёт объёмов слоёв, планарных и поверхностных площадей как для выделенных частей, так и для бухт в целом.

Рассчитанные дискретные значения площадей и объёмов для бухт в целом как функция глубины для получения соответствующих кривых в про-

грамме *SigmaPlot* 10.0 аппроксимировались рациональными трехпараметрическими функциями вида:

$$f(x) = (a + bx)/(c + x), \quad (4)$$

где a , b , c – коэффициенты. Выбор аппроксимирующей функции был обусловлен максимальными значениями коэффициентов детерминации для этого типа функций.

Результаты и обсуждение. Полученные морфометрические модели Севастопольской и Балаклавской бухт представлены на рис.1 и 2, а морфометрические характеристики частей и бухт в целом приведены в табл.1 и 2. Следует отметить, что в табл.1 и 2 приведены как площади и объёмы Севастопольской и Балаклавской бухт, полученные как суммы площадей и объёмов частей бухт, так и эти же параметры, рассчитанные по единому массиву данных для каждой бухты (см. примечания к таблицам). Сопоставление этих величин показало, что различия составляли 0,1 % для площадей и 0,3 – 0,5 % для объёмов. Не вполне очевидным явился тот факт, что отношение площадей поверхности к площадям дна составило 0,997 и 0,955 для Севастопольской и Балаклавской бухт соответственно.

Оценки некоторых компонент водного баланса бухт показывают, что годовой объём стока р.Чёрная составляет 70 %, а хозяйственные и ливневые стоки – 4 % объёма Севастопольской бухты. Атмосферные осадки составляют приблизительно по 3,5 % объёмов Севастопольской и Балаклавской бухт, испарение 9 – 10 % этих объёмов [13].

Параметры жидких границ (разрезов), ограничивающих части Севастопольской и Балаклавской бухт, приведены в табл.3. Для сравнения можно заметить, что в [2] приведена длина входа в Севастопольскую бухту 550 м (до постройки молов 940 м). Согласно нашим расчетам длина входа в бухту составляет 410 – 415 м, до постройки молов она составляла приблизительно 1200 м (дополнительная проверка была произведена в программе *Google Earth*).

Каких-либо морфометрических характеристик Балаклавской бухты в литературе нами не найдено. Единственная известная нам работа, в которой приводятся морфометрические характеристики Севастопольской бухты, была опубликована в 1993 г. [14]. Сопоставление полученных результатов с данными этой работы приведено в табл.4.

Следует отметить достаточно хорошее совпадение данных упомянутой работы с полученными нами результатами (за исключением Южной бухты), учитывая доступные в то время методические возможности.

На рис.3 представлены рассчитанные зависимости площадей и объёмов Севастопольской и Балаклавской бухт от глубины, которые позволяют, используя приведенные на рисунке формулы, рассчитывать указанные параметры для любой произвольной глубины.

Районирование Севастопольской бухты, выполненное с помощью дискриминантного анализа гидрохимических полей в [2], показало, что в бухте выделяются зоны слабого, умеренного, сильного и очень сильного загрязнения. Показательно, что выделенные в этой работе зоны хорошо совпадают с проведённым нами районированием бухты: часть 1 относится к зоне слабого загрязнения; часть 5 (с районом нефтяной гавани) – к зоне умерен-

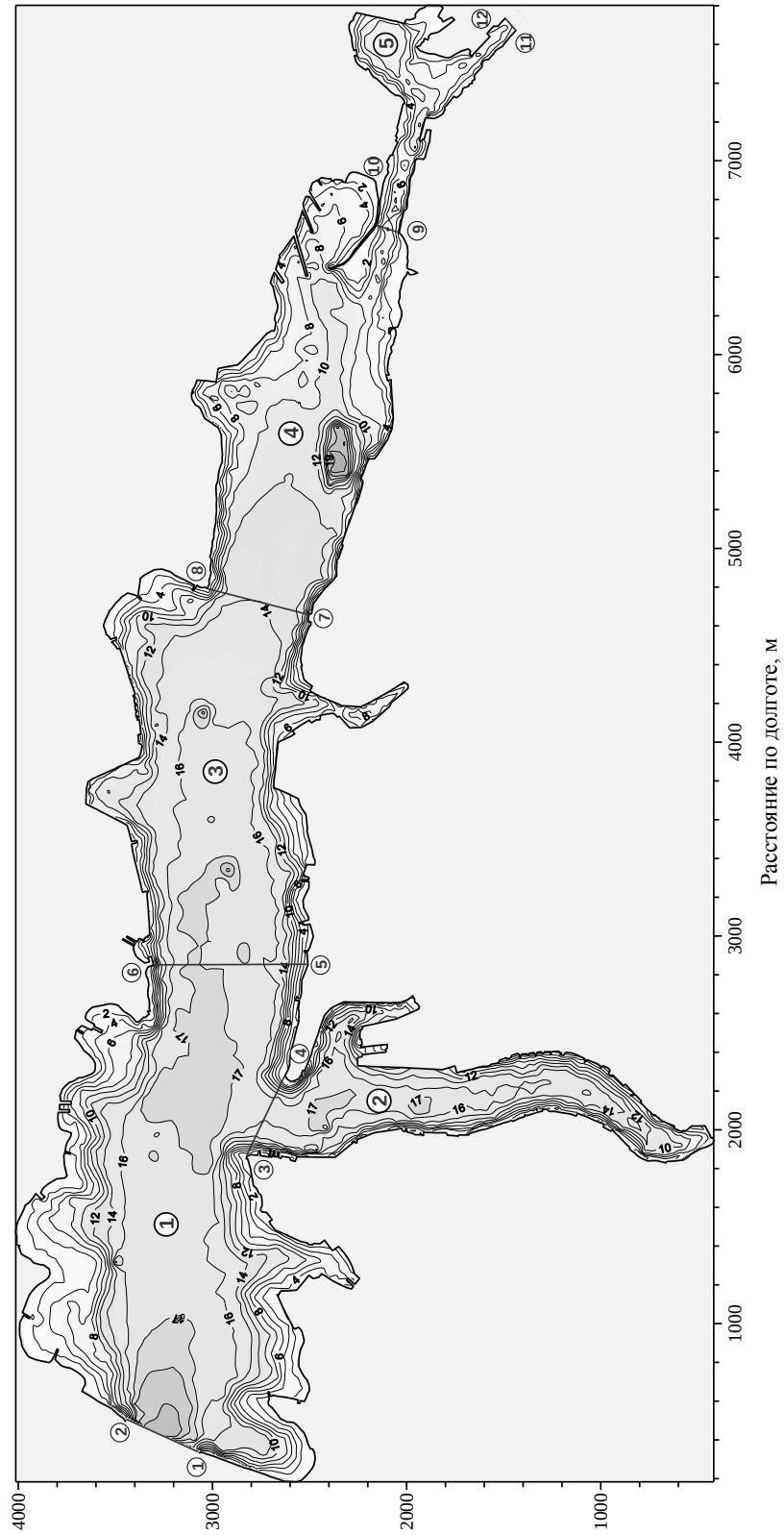
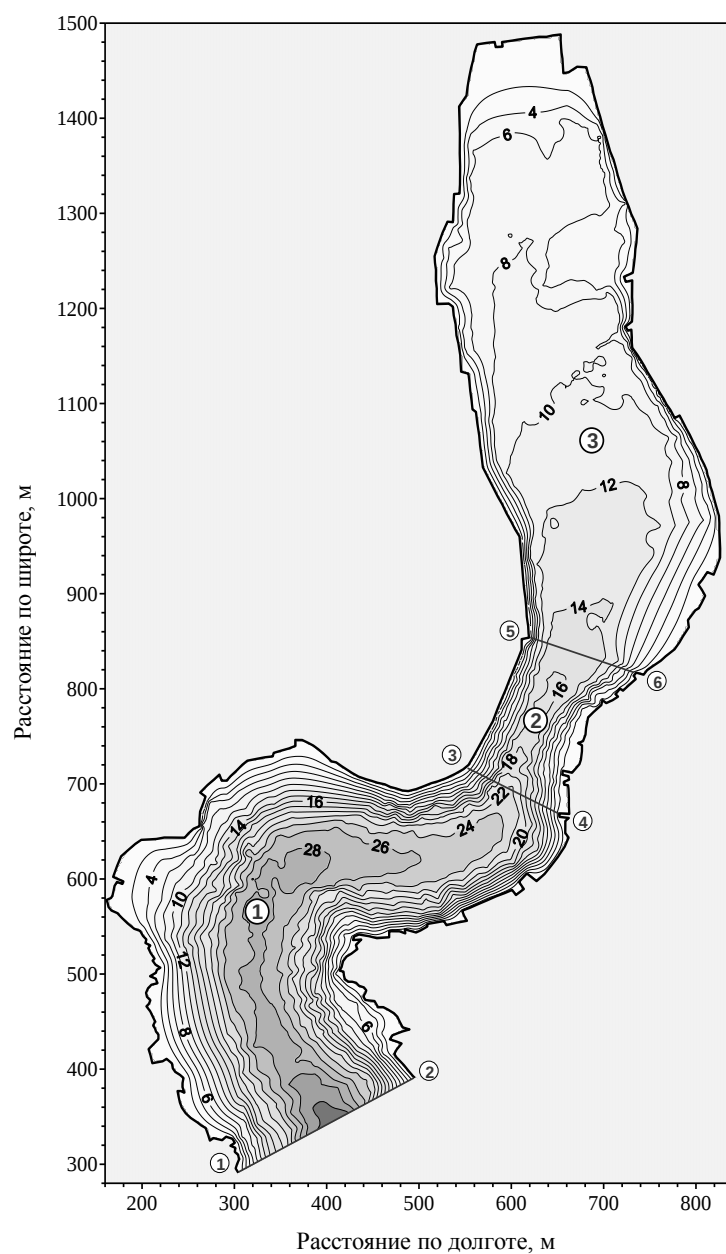


Рис. 1. Морфометрическая модель Севастопольской бухты. Изобаты приведены в метрах. Сплошными линиями показаны границы выделенных частей, цифрами – выделенные части (1 – 5) и концы граничных линий (1 – 12).



Р и с . 2 . Морфометрическая модель Балаклавской бухты. Изобаты приведены в метрах. Сплошными линиями показаны границы выделенных частей, цифрами – выделенные части (1 – 3) и концы граничных линий (1 – 6).

Т а б л и ц а 1. Морфометрические характеристики Севастопольской бухты и её частей.

слой, м	площадь верхней границы слоя, м ²	площадь дна в пределах слоя, м ²	объём слоя, м ³	площадь верхней границы слоя, м ²	площадь дна в пределах слоя, м ²	объём слоя, м ³
<i>часть 1</i>			<i>часть 2 (Южная бухта)</i>			
0 – 5	2826510	556660	12846480	802010	52010	4005460
5 – 10	2271340	431140	10219590	750830	153080	3433050
10 – 15	1842130	424540	8247620	600200	269770	2413020
15 – 20	1419100	1419410	2511960	331860	332040	402460
сумма	–	2831750	33825650	–	806900	10253990
периметр 10600 м			периметр 7860 м			
длина береговой линии 8940 м			длина береговой линии 7400 м			
средняя глубина 12,0 м			средняя глубина 12,8 м			
максимальная глубина 19,6 м			максимальная глубина 18,5 м			
<i>часть 3</i>			<i>часть 4</i>			
0 – 5	1745240	142590	8448430	1484400	284800	6744700
5 – 10	1603330	254910	7449610	1201180	566630	4719640
10 – 15	1350050	519740	5830120	635830	584850	1312400
15 – 20	831520	831630	1074690	51490	44860	157700
20 – 25	–	–	–	6830	6830	1200
сумма	–	1748870	22802850	–	1487970	12935640
периметр 8590 м			периметр 8140 м			
длина береговой линии 7260 м			длина береговой линии 7480 м			
средняя глубина 13,1 м			средняя глубина 8,7 м			
максимальная глубина 19,5 м			максимальная глубина 20,6 м			
<i>часть 5</i>			<i>вся бухта</i>			
0 – 5	320650	168680	1512090	7178810	1204740	33557160
5 – 10	152970	153160	250	5979650	1558920	25822140
10 – 15	290	290	70	4428500	1799190	17803230
15 – 20	–	–	–	2633970	2627940	4146810
20 – 25	–	–	–	6830	6830	1200
сумма	–	322130	1512410	–	7197620	81330540
периметр 4820 м			периметр 36190 м			
длина береговой линии 4630 м			длина береговой линии 35710 м			
средняя глубина 4,7 м			средняя глубина 11,3 м			
максимальная глубина 10,8 м			максимальная глубина 20,6 м			

Примечания: 1 – данные, кроме максимальных и средних глубин, округлены до десятков м, м и м², 2 – рассчитанные по единому массиву данных параметры Севастопольской бухты составляют: объём **81802810** м³, площадь поверхности **7175920** м², площадь дна **7193460** м².

Т а б л и ц а 2. Морфометрические характеристики Балаклавской бухты и её частей.

слой, м	площадь верхней границы слоя, м ²	площадь дна в пределах слоя, м ²	объём слоя, м ³	площадь верхней границы слоя, м ²	площадь дна в пределах слоя, м ²	объём слоя, м ³
<i>часть 1</i>			<i>часть 2</i>			
0 – 5	116390	19500	534130	16210	4380	70320
5 – 10	98150	17400	452030	12300	3970	54020
10 – 15	82250	15730	376680	9160	4690	36840
15 – 20	68160	16570	304390	5160	5190	8130
20 – 25	53060	23930	215330	230	270	170
25 – 30	30180	28200	73400	–	–	–
30 – 35	2420	2530	3210	–	–	–
сумма	–	123860	1959170	–	18500	169480
периметр 2000 м			периметр 630 м			
длина береговой линии 1670 м			длина береговой линии 400 м			
средняя глубина 15,8 м			средняя глубина 9,2 м			
максимальная глубина 33,9 м			максимальная глубина 22,2 м			
<i>часть 3</i>			<i>вся бухта</i>			
0 – 5	122140	28570	542390	254740	52450	1146840
5 – 10	94850	58550	337280	205300	79920	843330
10 – 15	37190	37090	70620	128600	57510	484140
15 – 20	300	300	50	73620	22060	312570
20 – 25	–	–	–	53290	24200	215500
25 – 30	–	–	–	30180	28200	73400
30 – 35	–	–	–	2420	2530	3210
сумма	–	124510	950340	–	266870	3078990
периметр 1820 м			периметр 3990 м			
длина береговой линии 1700 м			длина береговой линии 3770 м			
средняя глубина 7,6 м			средняя глубина 11,5 м			
максимальная глубина 15,4 м			максимальная глубина 33,9 м			

П р и м е ч а н и я : 1 – данные, кроме максимальных и средних глубин, округлены до десятков м, м² и м³; 2 – рассчитанные по единому массиву данных параметры Балаклавской бухты составляют: объём 3 086 130 м³, площадь поверхности 254 470 м², площадь дна 264 880 м².

Т а б л и ц а 3. Характеристики разрезов Балаклавской и Севастопольской бухт.

начало разреза		конец разреза		длина разреза, м	площадь сечения разреза, м ²
№ точки	координаты	№ точки	координаты		
Балаклавская бухта					
1	44° 29' 34,2" с.ш. 33° 35' 43,6" в.д.	2	44° 29' 37,4" с.ш. 33° 35' 52,3" в.д.	220	4570
3	44° 29' 48,1" с.ш. 33° 35' 54,9" в.д.	4	44° 29' 46,5" с.ш. 33° 35' 59,3" в.д.	110	1400
5	44° 29' 52,5" с.ш. 33° 35' 57,8" в.д.	6	44° 29' 51,2" с.ш. 33° 36' 02,9" в.д.	120	1460
Севастопольская бухта					
1	44° 37' 16,3" с.ш. 33° 30' 32,8" в.д.	2	44° 37' 28,6" с.ш. 33° 30' 40,1" в.д.	410	7150
3	44° 37' 08,3" с.ш. 33° 31' 42,6" в.д.	4	44° 37' 01,9" с.ш. 33° 32' 01,2" в.д.	460	5620
5	44° 36' 58,3" с.ш. 33° 32' 27,2" в.д.	6	44° 37' 23,9" с.ш. 33° 32' 27,2" в.д.	790	11730
7	44° 36' 58,0" с.ш. 33° 33' 49,5" в.д.	8	44° 37' 14,9" с.ш. 33° 33' 55,4" в.д.	540	6620
9	44° 36' 43,0" с.ш. 33° 35' 18,7" в.д.	10	44° 36' 46,8" с.ш. 33° 35' 20,1" в.д.	120	690
11	44° 36' 22,0" с.ш. 33° 36' 08,8" в.д.	12	44° 36' 23,4" с.ш. 33° 36' 10,0" в.д.	60	145

Примечания: 1 – данные округлены до десятков м и м²; 2 – координаты точек приведены в системе координат Пулково – 42, точки показаны на рис.1, 2.

Т а б л и ц а 4. Сравнительные морфометрические характеристики Севастопольской бухты.

работа	Севастопольская бух- та (без Южной)		Южная бухта		сумма	
	площадь 0 м, км ²	объем, км ³	площадь 0 м, км ²	объем, км ³	площадь 0 м, км ²	объем, км ³
[14]	7,35	0,079	0,61	0,0071	7,96	0,086
настоящая работа	6,38	0,071	0,80	0,0103	7,20	0,081
различия	0,97 (13 %)	0,008 (10 %)	– 0,19 (31 %)	– 0,0032 (45 %)	0,76 (10 %)	0,005 (6 %)

Примечание: В [2] приведена площадь Севастопольской бухты 7,62 км²

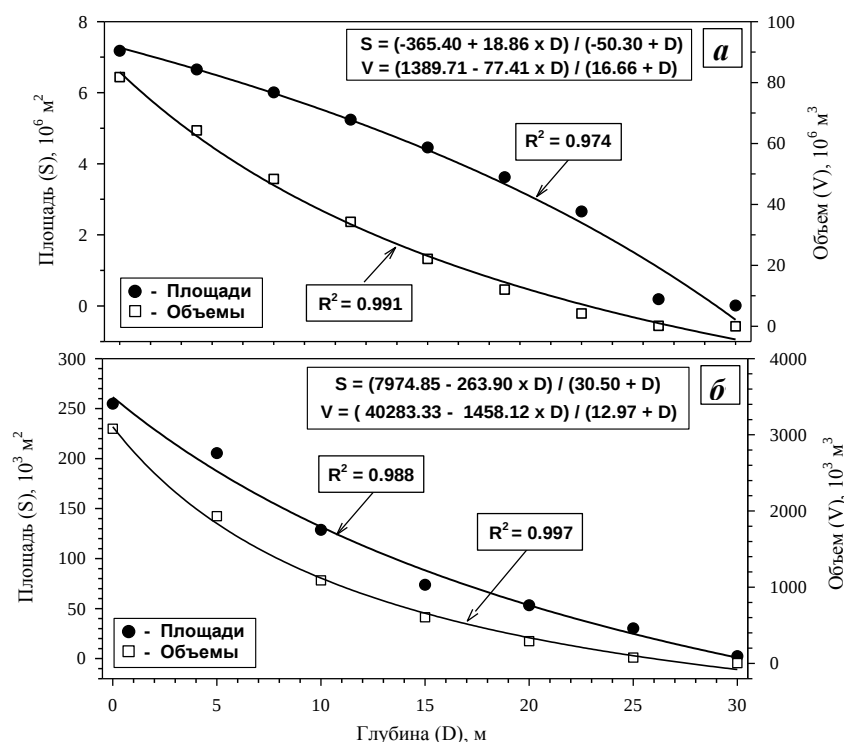


Рис. 3. Кривые площадей и объёмов Севастопольской (а) и Балаклавской (б) бухт.

ного загрязнения; части 3 и 4 – к зоне сильного загрязнения; часть 2 (Южная бухта) – к зоне очень сильного загрязнения (рис.1).

Выводы. Таким образом, рассчитанные с помощью созданных моделей морфометрические характеристики (объёмы слоев, планарные и поверхностные площади, площади разрезов, длины береговых и граничных линий) для Севастопольской и Балаклавской бухт и их выделенных частей позволяют специалистам различных областей рассчитывать запасы химических веществ в воде и донных отложениях бухт, а также проводить в дальнейшем, при знании потоков поступления и удаления веществ, оценки экологической ёмкости этих акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоролич Н.Г. Расчет водообмена мелководного залива (бухты) с морем // Тр. ГОИН.– 1986.– 168.– С.113-18.
2. Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / Препринт.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– 90 с.
3. Костова С.К. Распределение ртути в поверхностном слое донных отложений Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.12.– С.273-279.

4. Малахова Л.В. Распределение полихлорированных бифенилов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.12.– С.268-272.
5. Овсяный Е.И., Романов А.С., Игнатьева О.Г. Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морской экологический журнал.– 2003.– 2 (2).– С.85-101.
6. Современное состояние прибрежных вод Крыма (черноморский сектор) / Под ред. В.Н. Еремеева.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– 511 с.
7. Шапиро Н.Б., Юценко С.А. Моделирование ветровых течений в Севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– 1.– С.42-56.
8. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г., Стокозов Н.А., Евтушенко Д.Б. Модель крупномасштабного загрязнения Черного моря долгоживущими радионуклидами цезием-137 и стронцием-90 в результате аварии на ЧАЭС // Водные ресурсы.– 1993.– 20 (3).– С.326-330.
9. Кошляков М.Н. Физические основы метода резервуаров в проблеме глубинной океанической циркуляции // Изв. АН СССР. ФАО.– 1966.– 2 (9).– С.452-460.
10. Божок А.П., Дрич К.И., Евтифеев С.А. и др. Топография с основами геодезии / Под ред. А.С.Харченко и А.П.Божок.– М.: Высшая школа, 1986.– 303 с.
11. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 / Interpolating multivariate data.– New York: John Wiley & Sons, 1981 – P.21-36.
12. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение.– М.: Мир, 1989.– 295 с.
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.4. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И.Симонова и Э.Н.Альтмана.– С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991.– 429 с.
14. Морочковский В.А., Ковальчук Ю.Л. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты // Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия.– Киев: Наукова думка, 1993.– С.17-24.

Материал поступил в редакцию 10.10.2010 г.