

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.472; 528.475

**В. В. Волков,
А. А. Елагин,
А. Л. Демидов**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассмотрен вопрос использования спутниковых радионавигационных систем второго поколения для определения уровня моря. Представлены дифференциальные методы повышения точности спутниковых измерений, используемые в современной гидрографии. Отображены методы определения поправок за уровень моря, используемые производителем спутниковой радионавигационной аппаратуры — компанией Veripos. Указаны недостатки данных методов определения колебаний уровня моря. Произведена оценка точности измерений глубины согласно требованиям российских и международных стандартов, а также с учетом технических характеристик используемого для этих целей оборудования. Представлен математический алгоритм исправления эллипсоидальной высоты принимающей радионавигационной антенны при отклонении судна от состояния равновесия под воздействием внешних сил. Приведено подробное описание метода приведения исправленной высоты антенны к выбранному нулю глубин и определение поправок к измеренной глубине за уровень моря. Отмечены достоинства и недостатки данного метода, а также особенности применения при производстве гидрографических изысканий.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, эллипсоидальная высота, углы крена и дифферента, динамическое проседание, матрица поворота, нуль глубин, уровненный пост.

В СВЯЗИ с развитием спутниковых радионавигационных систем (СРНС) появилась возможность учитывать колебания уровня моря в режиме реального времени. Данный метод основан на определении высоты антенны приемника, высотная отметка которой напрямую зависит от колебаний уровня моря. При использовании дифференциального метода повышения точности спутниковых измерений КРВ (кинематика реального времени) осуществляется обсервация не только плановых координат с сантиметровой точностью, но и геодезической высоты мгновенной поверхности моря и ее приведение к выбранному нулю глубин. Однако не всегда представляется возможным использование данного метода ввиду ограничения по дальности действия (10 – 15 км) [1]. В связи с этим обстоятельством производство морских инженерных изысканий осуществляется с использованием *дифференциального метода повышения точности спутниковых измерений* — DGPS (*Differential Global Positioning System*), при работе с которым не всегда существует возможность приведения высоты мгновенной поверхности моря к выбранному нулю глубин, что делает необходимым определение колебаний уровня моря при помощи уровневых измерений с установкой берегового или донного уровневого поста [2].

Современные спутниковые навигационные системы позволяют определить пространственные координаты антенны: X , Y (плановые координаты) и Z (высотная координата). По данным высотной отметки антенны приемника, записанным в течение определенного временного промежутка, можно смоделировать ход уровня моря, который в дальнейшем можно привести к выбранному нулю глубин и определить поправки в глубину за уровень моря. Американской компанией «Veripos» были произведены исследования в этой области, в результате чего был создан математический алгоритм определения хода уровня моря и соответствующая опция программного обеспечения *VerifyQC*, суть которой состоит в определении колебаний уровня моря относительно двух различных систем высот посредством регистрации высоты антенны:

- *Geoid Tide* (относительно модели геоида, выбранного в соответствующем диалоговом окне);
- *Ultra Tide* (относительно среднего уровня моря, для этого необходимо как минимум 39 ч непрерывных наблюдений за уровнем моря).

Для исключения динамического проседания судна (Heave) программное обеспечение вычисляет среднее значение по всем значениям, полученным в течение заданного временного интервала (производитель рекомендует использовать десятиминутный интервал для усреднения).

Однако вследствие воздействия внешних сил нахождение судна в состоянии покоя практически исключено. В связи с этим указанный метод не учитывает углы крена и дифферента, а также мгновенного динамического проседания. Рассмотрим метод, позволяющий учитывать данные значения при определении высотной отметки антенны приемника. Для реализации данного метода необходимо использовать следующее оборудование:

- спутниковый приемник с подключенным дифференциальным сервисом;
- компенсатор качки с точностью определения углов крена и дифферента $0,1^\circ$, динамического проседания 10 см или 5 % от наибольшего значения [3];
- датчик осадки судна с точностью определения глубины водного столба 10 см;
- электронную гидрографическую информационную систему (ЭГИС) для регистрации навигационных данных в определенном формате данных (ASCII) [4];
- мареограф (для определения превышения нуля глубин над эллипсоидом).

Выполним подробное описание алгоритма исправления высоты антенны, а также ее приведение к нулю глубин и определим оценку точности измерений. Согласно требованиям Международной гидрографической организации [5] – [7] максимальная высотная неопределенность (TVU — *Total Vertical Uncertainty*) не должна превышать значения, рассчитанного по следующей формуле:

$$TVU = \pm \sqrt{a^2 + (bd)^2}, \quad (1)$$

где a — параметр, выражающий ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины; b — параметр, выражающий ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины; d — глубина.

Параметры a и b приведены в источнике [5]. Для особой категории съёмки в районах, где глубина под килем имеет критическое значение, $a = 0,25$ м и $b = 0,0075$. Следовательно, максимальная высотная неопределенность на глубине 1 м, согласно формуле (1), равна $\pm 0,25$ м.

Согласно требованиям [8], точность измерения глубин является удовлетворительной, если выполняется равенство:

$$m_{zcl} \leq m_{z0}, \quad (2)$$

где m_{z0} — средняя квадратическая погрешность измерения глубин; m_{zcl} — допустимая погрешность измерения глубин в процентах, которая переводится в метры по формуле

$$m_{z0} = m_{zcl} \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

Допустимая погрешность измерения глубин изменяется в зависимости от глубины, расчлененности рельефа дна и выбранного масштаба съёмки. Для диапазона глубин 5 – 20 м, при нерасчлененном рельефе с углами наклона до 2° и масштабе 1 : 2000, допустимая средняя квадратическая погрешность, согласно формуле (2), будет равна 31 см.

Теперь рассмотрим точность определения высотной отметки антенны при помощи спутниковых наблюдений. Остановимся на примере спутникового приёмника C-Nav 3050 с подключенными дифференциальными коррекциями SF2, компенсатором качки Kongsberg MRU5+ и датчиком осадки судна *Valeport Tide Master Portable Tide Gauge*. Согласно техническим характеристикам данных приборов, указанных производителями, суммарная погрешность исправления высоты антенны, а также её приведение к нулю глубин будет составлять $\pm 16 - 18$ см. Однако следует учитывать погрешность измерения самой глубины. Поэтому для того, чтобы погрешность исправленной глубины удовлетворяла указанным ранее требованиям нормативных документов, необходимо наиболее точно учитывать факторы, которые могут оказать влияние на точность измерения глубины (скорость звука, измерение офсетных расстояний и др.).

Рассмотрим случай, когда под воздействием внешних сил судно отклоняется от положения равновесия на углы крена α и дифферента β , также имеет динамическое проседание H , вследствие чего изменяется высотное положение принимающей антенны спутниковой радионавигационной системы в судовой системе координат, а также её эллипсоидальная высота H_0 . На рис. 1 приведено влияние угла крена на высотное положение антенны, где H_0 — положение антенны в состоянии равновесия судна и H'_0 — положение антенны, когда судно отклонено на угол крена α .

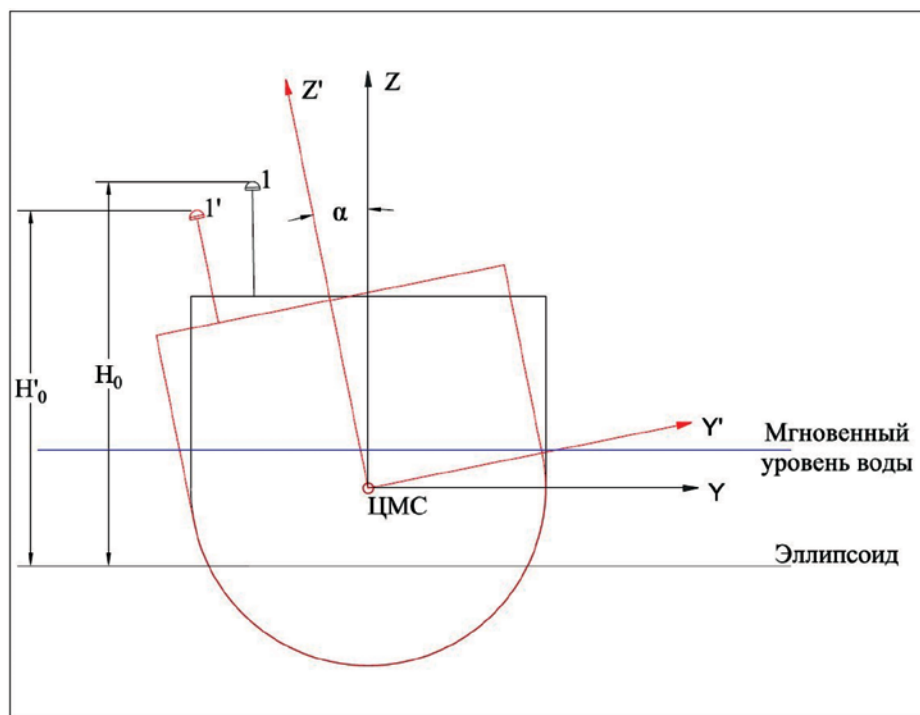


Рис. 1. Влияние крена на положение антенны

Принимающая радионавигационная антенна имеет собственные координаты в системе координат судна x, y, z . Направление осей системы координат судна приведено на рис. 2. Ось Ox направлена в нос судна и совпадает с диаметральной плоскостью судна, ось Oy направлена в правый борт, ось Oz — вверх.

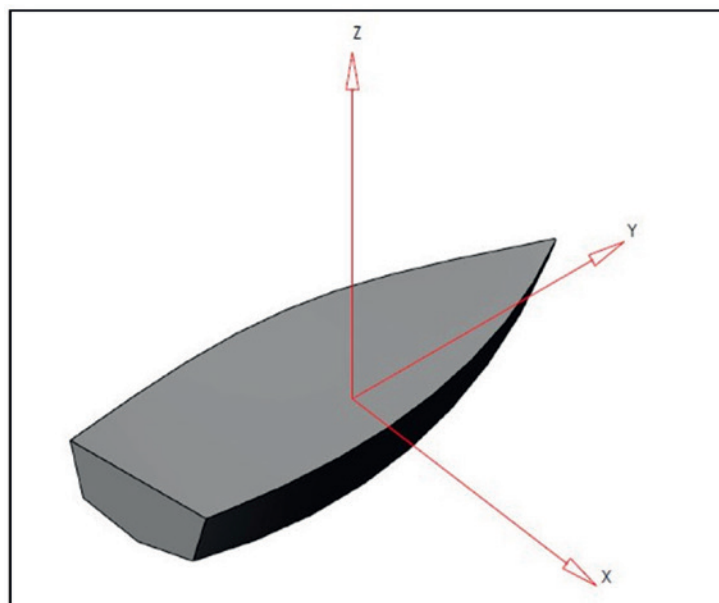


Рис. 2. Направление осей системы координат судна

При влиянии крена и дифферента происходит поворот антенны относительно осей Ox и Oy соответственно. Поворот относительно оси Oz (изменение курса судна) не оказывает влияния на высоту антенны. Поэтому для расчета исправленной высоты антенны необходимо использовать матрицу поворота в трехмерной пространстве, так как любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных (перпендикулярных) осей (в данном случае двух осей). Для определения поправок в эллипсоидальную высоту принимающей радионавигационной антенны необходимо умножить соответствующую матрицу поворота на вектор-столбец, описывающий вращаемую точку (в данном случае за вектор-столбец принимаются координаты антенны в судовой системе координат) [9].

Определение поправки в эллипсоидальную высоту антенны за угол крена Δz_k :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$x' = x \cdot 1 + y \cdot 0 + z \cdot 0 = x; \quad (5)$$

$$y' = x \cdot 0 + y \cdot \cos \alpha + z \cdot (-\sin \alpha); \quad (6)$$

$$z' = x \cdot 0 + y \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha; \quad (7)$$

$$\Delta z_k = z' - z. \quad (8)$$

Определение поправки в эллипсоидальную высоту антенны за угол дифферента:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$x' = x \cdot \cos \beta + y \cdot 0 + z \cdot \sin \beta; \quad (10)$$

$$y' = x \cdot 0 + y \cdot 1 + z \cdot 0 = y; \quad (11)$$

$$z' = x \cdot (-\sin \beta) + y \cdot 0 + z \cdot \cos \beta; \quad (12)$$

$$\Delta z_d = z' - z. \quad (13)$$

Расчет исправленной эллипсоидальной высоты принимающей спутниковой радионавигационной антенны представим в виде

$$H_n = H_0 \pm \Delta z_k \pm \Delta z_d \pm H. \quad (14)$$

Знак вводимых поправок зависит от знака углов крена и дифферента, а также от расположения антенны относительно центра судовой системы координат. Также необходимо учитывать величину динамического проседания судна H в данный момент времени. После того как был произведен расчет исправленной эллипсоидальной высоты антенны, необходимо рассчитать положение уровня моря относительно выбранного нуля глубин. На рис. 3 схематично отражена суть данного метода.

Для того чтобы определить положение уровня моря относительно выбранного нуля глубин, необходимо иметь датчик осадки судна, положение которого определено в судовой системе координат. Зная это, можно определить высотное расстояние между спутниковой радионавигационной антенной и датчиком осадки K . Расстояние от исправленной высоты антенны до мгновенного уровня моря [1], [10] будет равно:

$$T = K - \text{осадка}. \quad (15)$$

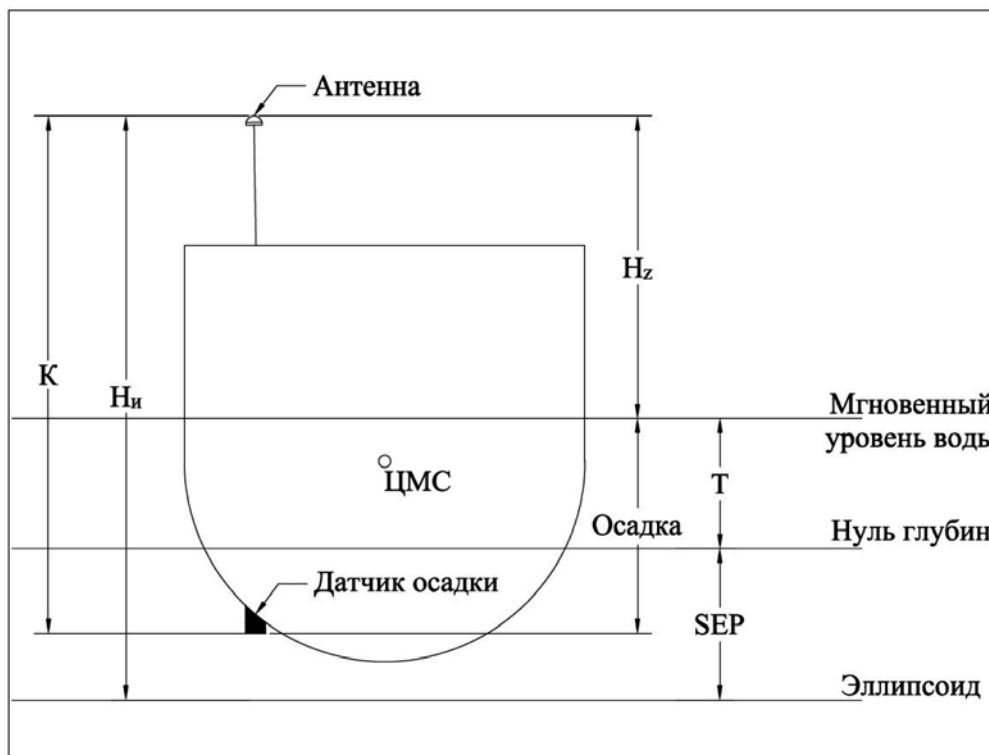


Рис. 3. Определение положения уровня моря относительно выбранного нуля глубин

Следовательно, поправка за уровень моря будет равна:

$$T = H_{и} - H_z \pm SEP, \quad (16)$$

где SEP — превышение нуля глубин над эллипсоидом.

Таким образом, согласно результатам проведенного исследования, была разработана теоретическая основа метода определения уровня моря при помощи спутниковых радионавигационных систем второго поколения. Представленный математический алгоритм расчета эллипсоидальной высоты антенны приемника, в отличие от метода, предложенного компанией «Veripos», позволяет учитывать перемещения судна, вызванные воздействием внешних сил (крен, дифферент и динамическое проседание). Кроме того, в рамках данного метода возможен переход от высоты антенны к фактическому уровню моря с последующим приведением к выбранному нулю глубин, что позволяет улучшить контроль качества батиметрических данных на первоначальной стадии обработки измерений. Однако для практической реализации данного метода необходимо использование уровенного поста для определения величины SEP (расстояние по нормали между геоидом и эллипсоидом) [11]. Ввиду непараллельности поверхностей эллипсоида и геоида (нуль глубин) данный метод будет справедлив тогда, когда известна разница между этими поверхностями. Для использования на любой акватории необходимо производить расчеты перехода с эллипсоида на геоид перед началом изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фирсов Ю. Г. Методы использования спутниковой аппаратуры, реализующей режим кинематики реального времени (RTK) для определения поправок за уровень моря / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1. — С. 21–26.
2. Фирсов Ю. Г. Определение высоты уровня моря в геоцентрической системе с использованием высокоточного спутникового сервиса С-NAV / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов // Геодезия и картография. — 2007. — № 6. — С. 55–64.

3. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
4. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения. — М.: Изд-во «Стандартинформ», 2006. — 71 с.
5. IHO Standards for Hydrographic Surveys (5th Edition). — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 с.
6. Фирсов Ю. Г. Пятая редакция международного стандарта на гидрографические съемки S-44 Международной гидрографической организации / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 1 (51). — С. 39–44.
7. Нестеров Н. А. О допустимой величине погрешности местоположения глубины при выполнении детальной съемки / Н. А. Нестеров // Навигация и гидрография. — 2013. — № 35. — С. 53–58.
8. СП 11-114-2004. «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений». — М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004.
9. Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики / В. Ф. Журавлев. — М.: Физматлит, 2001. — 319 с.
10. Sander P. RTK tide basic//HYDRO International. — 2003. — Vol. 7. — № 10. — Pp. 26–29.
11. РД 31.74.04-2002. «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним». — М., 2002. — 88 с.

SEA LEVEL DETERMINATION BY GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

The study examines usage of Global Satellite Systems for sea level determination. The modern differential method of accuracy increasing are presented. The methods of sea level correction determination used by manufacturer of GNSS equipment are presented. Estimated accuracy of depth measurements is performed in accordance with Russian and International Standards requirements and technical characteristics of equipment used. The mathematical algorithm of antenna ellipsoid height correction due to attitude influence is described. Reduction of corrected antenna height to chart datum and determination of sea level correction are described. Advantages and disadvantages are noted.

Keywords: Global Satellite Navigation Systems, ellipsoid height, angles of roll and pitch, heave, rotation matrix, chart datum, tide gauge.

REFERENCES

1. Firsov, Yuriy Georgievich. “Metody ispolzovaniya sputnikovoi apparatury, realizuiushchei rezhim kinematiki realnogo vremeni (RTK) dlia opredeleniya popravok za uroven moria.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2007): 21-26.
2. Firsov, Yuriy Georgievich, and M. V. Ivanov. “Definition of sea level altitude in geocentric system using C-NAV high-accuracy satellite service.” *Geodesy and Cartography* 6 (2007): 55-64.
3. Firsov, Yuriy Georgievich. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov*. SPb: Nestor-istoriya, 2010.
4. Russian Federation. State Standard GOST R 52438-2005. Geograficheskie informatcionnye sistemy. Terminy I opredeleniya. M.: Standartinform, 2006.
5. *IHO standards for hydrographic surveys*. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
6. Firsov, Yuriy Georgievich. “5th edition of the International standard for hydrographic mapping S-44 of the International Hydrographic Organization (based on the materials form foreign sources).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2008): 39-44.
7. Nesterov, N.A. “O dopustimoi velichine pogreshonisti mestopolozeniya glubiny pri vypolnenii detalnoi semki.” *Navigatsiya i gidrografiya* 35 (2013): 53-58.
8. Russian Federation. Set of regulations SP 11-114-2004. Inzhenernye izyskaniya na kontinentalnom shelfe dlya stroitelstva morskikh neftegazopromyslovykh sooryzheniy. M.: FGUP PNIIS (Glavstroii Rossii), 2004.
9. Zhyravlev, Viktor Fillipovich. *Osnovy teoriticheskoy mahanici*. M.: Fizmalit, 2001.
10. Sanders P. “RTK tide basic.” *HYDRO International* 7.10 (2003): 26-29.
11. Russian Federation. Regulatory Document RD 31.74.04-200. Tehnologiya promernykh rabot pri proizvodstve dnouglubitelnykh rabot i pri kontrole glubin dlya bezopasnosti plavaniya sudov v morskikh portakh i na podhodax k nim. M., 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волков Виталий Владимирович — инженер-гидрограф.
ЗАО «РОМОНА»
volkovvv1982@mail.ru
Елагин Антон Анатольевич — аспирант.
Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
elagintony@gmail.com
Демидов Александр Леонидович — аспирант.
Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
alexandrдемидов@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volkov Vitaliy Vladimirovich — hydrographic surveyor.
ROMONA Inc.
volkovvv1982@mail.ru
Elagin Anton Anatolievich — postgraduate.
Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich — Dr. of Technical science, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
elagintony@gmail.com
Demidov Aleksandr Leonidovich — postgraduate.
Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich — Dr. of Technical science, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
alexandrдемидов@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2015.

УДК 551.4

**Д. М. Белов,
Н. И. Дорошенко**

**ОСНОВЫ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ МОРФОДИНАМИКОЙ
БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ**

Приведены теоретические основы управления объектами неживой природы, в том числе береговой зоны, базирующиеся на определении главных целей, которые должны достигаться в результате обозначенного процесса. Чаще всего одной из основных целей является восстановление равновесного состояния морфодинамической системы, которое достигается корректировкой контрольных параметров, описывающих её существующее состояние. Приведены определения основных используемых в настоящей статье терминов. Изложены основные положения математического моделирования динамики береговой зоны моря, представлена схема такой модели и указаны участки береговых зон различных морей, на которых эта математическая модель применялась. Показаны примеры её удачного использования для управления морфодинамическими системами в береговой зоне Финского залива в районе пос. Нарва-Йыэсуу (Эстонская республика), включая использование искусственного гидротехнического сооружения — подводного песчаного рифа для подпитки восстанавливаемого пляжа и формирование авантюны с помощью металлической трубы большого диаметра.

Ключевые слова: береговая зона моря, управление процессами и объектами, реформирование, морфодинамика.



АСТОЯЩАЯ статья посвящена вопросу защиты и восстановления морских побережий от негативного воздействия на него как природных процессов, так и антропогенного воздействия. Данная тема является особенно актуальной для побережья Финского залива в границах Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга. Это, прежде всего, связано с большим объёмом строительства (как гидротехнического, обусловленного строительством портовых ком-