

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БЮДЖЕТА НАНОСОВ УЧАСТКА КЕРЧЕНСКОЙ БУХТЫ И ЗАНОСИМОСТИ ПОДХОДНОГО КАНАЛА КЕРЧЕНСКОГО МОРСКОГО ТОРГОВОГО ПОРТА (КМТП)**

*Предложен статистический метод оценки деформации морского дна по данным промера глубин. Интегральная оценка бюджета дана по результатам эрозии дна и осаждения наносов. Выявлены участки наибольшей заносимости морского канала, оценены критические проходные глубины.*

**Ключевые слова:** бюджет наносов, деформации морского дна, эрозия дна, аккумуляция, морской канал, заносимость, статистические характеристики, гауссовский процесс.

**Введение.** Приходную статью баланса наносов составляет твердый материал, поступающий в результате абразии берегов, с речным стоком или с прибрежных склонов, с вдольбереговым потоком, подаваемый с глубины или соседних участков путем поперечного перемещения взвешенных и влекомых наносов и теряющих свою массу под действием силы тяжести.

Расходная часть состоит из материала, выносимого с данного участка вследствие размыва морского дна, техногенных изъятий – при разработке россыпей подводных карьеров, дноуглублений портовых акваторий и подходных каналов.

Механизм взвешивания частиц определяется следующим неполным перечнем факторов [1-4]: морфологическими особенностями морского дна; геометрической формой и гидравлической крупностью частиц, их шероховатостью и связанностью между частицами, лежащими на дне; лобовым сопротивлением частиц при движении, определяемым нормальными и касательными напряжениями на поверхности частиц; физической плотностью вещества частиц и вязкостью среды, зависящей от температуры и солености морской воды; средней и придонной скоростями морских течений, распределением этих скоростей по глубине и ширине водной толщи; степенью и структурой турбулентности по глубине и ширине; циркуляционными течениями в бухте; особенностями поля волн в акватории бухты: распределением их высот. Особенностью индуцированных извне процессов в заливе, денивелиций уровня - перекосов водной поверхности по разным направлениям и пр.

Гидродинамика и литодинамика процессов формирования грунтов дна, движение и отложение наносов, представляют собой явления многофакторные, с наличием обратных связей, резонансными эффектами и пр. Основные причины деформации морского дна к тому же определяются цепочкой взаимодействующих между собой составляющих системы

«атмосфера – гидросфера - литосфера» и т.д., а это многократно усложняет процесс оценки составляющих бюджета наносов.

**Обоснование статистического метода.** Бюджет наносов конкретного участка морского дна и заносимость морского канала определяются весьма внушительным числом факторов, поэтому результат оценки этого процесса чаще всего оказывается весьма приблизительным [5], это взгляд с одной стороны. С другой стороны, в теории вероятностей доказывается, что если некоторая величина  $X$  представляет собой сумму (или линейную функцию) большого числа независимых одна от другой величин

$$X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n, \quad (1)$$

то независимо от вероятностных законов распределения отдельных частных слагаемых распределение суммарной величины  $X$  стремится при  $n \rightarrow \infty$  к нормальному закону (или близкому к нему).

Это утверждение называется центральной предельной теоремой теории вероятностей. Приведенная выше формулировка принадлежит А.М. Ляпунову. Более того, академик А.А. Марков, а затем С.Н. Берштейн показали, что условие полной независимости слагаемых для сходимости к закону Гаусса не является строго обязательным и что предельная теорема теории вероятностей выполняется и для частично зависимых слагаемых.

Именно с этим уточнением мы имеем дело при анализе процесса деформации морского дна и оценке баланса наносов участка морского дна. И в этом частном его смысле изменчивость глубин, которые являются показателями размыва и аккумуляции, можно рассматривать как величины случайные. То есть обусловленные изменениями столь большого числа гидро- и литодинамических факторов, взаимное действие которых не выявлено, что общий результат их действия, - деформации морского дна – может изучаться пока вероятностными методами.

Статистический метод позволяет изучать интегральное (суммарное) действие многопричинного явления - процессов размыва и аккумуляции наносов на морском дне – еще до того как будет изучено влияние каждого фактора в отдельности на деформацию морского дна.

**Характеристика исходных данных.** Деформация морского дна в Керченской бухте оценивается по данным промера, выполненного в М 1:2000 сотрудниками ЧерноморНИИпроекта по схеме галсов. Судно во время проведения работ иногда отклонялось от курса галса, поэтому в отдельных случаях производилась экстраполяция данных промера в узлы сетки. В указанном районе выполнялась система поперечных по отношению к оси канала галсов. Поперечные галсы располагались через 40м, промер производился через 10м. Поэтому продольные, параллельные оси канала галсы, можно получить также через 10м, с промерными точками через 40м. В итоге, одна промерная точка отображает участок деформаций дна размером  $400\text{м}^2$

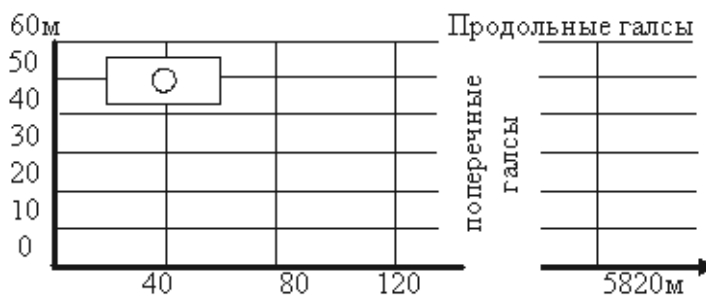


Рисунок 1- Схема продольных и поперечных галсов. Элемент площади, относящейся к одной промерной точке.

В продольном направлении было выделено 6 участков: из них 5 километровых участков (по 1000м) и последний, 6-й – длиной 800м. Первый участок обозначен 0000-0960. Для первого и последнего галса промерная точка характеризует участок 20м до галса и 20м после, в сумме 40м. Поэтому имеем  $960+40=1000\text{м}$ . Последний участок именно поэтому обозначен: 5000-5820м. Таким образом, площадь, охваченная промером равна  $(5800+40) \times (400+10) = 2394400\text{м}^2$ .

В поперечном направлении по отношению к оси канала выделено пять характерных участков. Площадь дна канала, полоса вдоль оси канала шириной 90м

(40м слева от оси канала, 40м справа и  $\pm 5$  с обеих сторон). Далее слева и справа от участка дна канала расположены две полосы по 30м шириной, характеризующие процессы размыва и аккумуляции на откосах канала; и, наконец, участки забровочных пространств: по 130м шириной – левое забровочное пространство и правое забровочное пространство.

Промерные точки каждого галса характеризуют: 0-11 – левое забровочное пространство; 12-15 – левый откос канала; 16-24 – дно канала; 25-28 – правый откос канала; 29-40 – правое забровочное пространство.

Количество точек по отдельным участкам, характеризующие морфологическую структуру морского дна во время промера, показано в табл. 1.

Таблица 1 - Таблица количества промерных точек по характерным участкам района подходного канала КМТП

Участок вдоль канала \ Участки поперек канала	0000-0960	1000-1960	2000-2960	3000-3960	4000-4960	5000-5820
(0-11)	211	195	188	195	215	242
(12-15)	100	100	100	100	100	84
(16-24)	224	223	225	224	225	189
(25-28)	100	100	100	100	100	100
(29-40)	178	181	191	174	218	250
итого	813	799	804	793	858	848

Из табл.1 видно, что общее количество точек характеризующих деформацию дна – 4915, является статистически значимым. Среднее количество точек, характеризующих отдельные участки вдоль канала – 819. Участки в поперечном направлении представлены также достаточным количеством точек размыва и аккумуляции - от 159 до 172. Понятно, что это количество точек вдвое больше (два промера глубин) на площади 2.328 км<sup>2</sup> и хорошо отображают особенности участка морского дна. Разница между количеством планируемых точек 11640 и фактическим 9830 составляет потерю информации в размере 15,5%.

Эти потери связаны с объективными причинами: иногда с неточным выходом на курс галса, ухудшением погоды во время работы и прекращением промерных работ, отсутствием (потерей) питания для эхолота и т.д.

Несмотря на потерю части информации, в итоге следует заключить, что для анализа бюджета наносов на отдельных участках района подходного канала КМТП полученного количества промерных точек, в среднем  $n=163$ , вполне достаточно. Ошибка  $\Delta$  вычисленного объема наносов 74576 м<sup>3</sup>, на всех выделенных частных площадях, в этом случае составляет величину

$$\pm \Delta = 1.86 \cdot \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = 1.86 \cdot \frac{74576}{\sqrt{163}} = 10856 \text{ м}^3.$$

Этот результат является верным при гауссовском механизме процессов гидро- и литодинамики, лежащих в основе формирования, переноса (перемещения) и отложения наносов на дне моря и, как любая гипотеза, нуждается в проверке.

### **Расчет и анализ основных характеристик размыва и аккумуляции наносов в районе подходного канала КМТП.**

При статистической обработке данных, еще до начала обработки, определялись и в последующем решались следующие задачи:

- выполнялась критическая оценка данных с целью обнаружения технического брака, «шумовых выбросов» при определении глубин эхолотом, и устранение бракованных значений;

- осуществлялся просмотр совмещенных профилей промеров на экране дисплея, отбор характерных графиков для оценки особенностей деформации. Рассчитывались статистические характеристики по данным разностей глубин, характеризующих процесс размыва-намыва дна в районе исследований: средние величины деформаций по поперечным галсам и характерным участкам, дисперсии, величины среднего квадратического отклонения, третьи центральные моменты, коэффициенты вариации и асимметрии;

- оценивались вероятностные свойства законов распределения размыва и аккумуляции по графикам повторяемости деформаций, формулировались гипотезы о возможных законах распределения деформации дна в левом и правом забровочных пространствах и о процессах заносимости прорези канала, об особенностях накопления наносов и размывов дна в разных его районах;

- выявлялись участки подходного канала с наибольшей заносимостью, для проведения землечерпания в канале с целью восстановления лимитирующих глубин, и участки, где возможно принятие инженерных решений касающихся строительства гидротехнических сооружений, участки с устойчивым размывом.

Анализ совмещенных графиков галсов показал, что наиболее значительные размывы отмечаются на стенках правого откоса участка 1000-3000м, а аккумуляции - на стенках и левого и правого откосов на участке 1000 – 3000м от главного мола КМТП. Эти величины достигают максимальных значений (-1.70м) и (+1.60м). Вероятно, это связано с процессами разрушения откосов и ссувами слабых грунтов, с работой винтов большегрузных судов при неточном прохождении фарватера. Ясно, что такие случаи должны при анализе учитываться особо, - как антропогенные случаи деформации дна, не связанные с природой гидро- и литодинамики.

Повышение отметок дна больше 1м из 9830 промерных точек наблюдается в 9 случаях. Уменьшение - в 16 случаях: по 2-4 случая на каждом километре, на левом и правом откосах канала. Значительные размывы-ссувы встречаются при больших уклонах морского дна - и на бровках, и у подошвы откосов.

Расчет числовых характеристик деформации морского дна выполнялся в предположении о равной вероятности каждого измеренного значения глубины, с учетом поправки Бесселя для дисперсии. Коэффициент вариации имеет смысл при положительных значениях, поэтому средние значения деформации морского дна, в результате эрозии дна и аккумуляции наносов на нем, бралось по его абсолютной величине.

С механической точки зрения динамика наносов включает в себя процесс захватывания водным потоком твердых частиц, перенос их на некоторое расстояние, и, наконец, их отложение. Первая стадия называется эрозией (размывом), вторая – переносом или транспортом наносов, третья – аккумуляцией (намывом). Термин *заносимость* относится к искусственно организованным углублениям – району порта, подходным каналам и пр.

Самыми важными статистическими характеристиками являются устойчивые значение размыва и аккумуляции наносов на участке морского дна - средние значения деформации дна. Изменчивость этих характеристик вдоль канала показана в табл.2. В

таблице просматривается размыв дна в начале канала и превалирование осадения наносов на дно канала в его средней части и в районе раструба. Возникает вопрос: это закономерность или случайность?

В теории вероятностей разработаны способы решения таких задач, получившие название: метод разности средних, критерий серий, метод Фишера, [6] и т.д.

Первый метод дает хорошие результаты при известном выборочном законе распределения характеристики, в данном случае – законе распределения выборочных средних. Критерий серий – это непараметрический метод, здесь не требуется точного установления выборочного закона, его конкретного вида; средние величины рассматриваются как случайные характеристики размыва или намыва на дне вдоль подходного канала.

Каждое наблюдаемое значение средних разностей отметок дна, по промерам в конце августа и ноября 2001г., отнесено к одной из двух взаимно исключающих категорий: размыв обозначим (-), намыв (+) и выделим серии. Серией назовем последовательность наблюдаемых значений, перед которыми и после которых расположены наблюдаемые значения другой категории или наблюдения отсутствуют вообще. Количество серий, подсчитанных по данным расчетов, получено равным 20 из 146 значений ряда. Закон распределения серий, как случайных величин, известен [6].

Проверка гипотезы о наличии тренда неслучайных изменений в картине размыва–намыва осуществляется просто: по объему выборки ( $N=146$ ) находятся числовые границы количества серий соответствующие случайному процессу. При 90% доверительной вероятности эти числовые границы равны 60 и 81. В нашем случае количество серий равное 20 не попадает внутрь этих границ. Следовательно, изменение средних величин размыва и намыва вдоль канала нельзя идентифицировать в данном случае как случайные.

Механизм устойчивого отложения и размыва наносов в районе Керченской бухты, содержит в себе факторы ведущие, неслучайные, и случайные, трудно учитываемые при принятии инженерных решений. Заключение касается времени сентябрь - ноябрь 2001 года. В другие периоды года ответ может быть иным. Это можно выяснить только при продолжении исследований бюджета наносов и заносимости морского канала в течение минимум годового цикла.

Другой, по статистической значимости, характеристикой является дисперсия процесса. В физическом смысле, дисперсия может рассматриваться как численный показатель изменения интенсивности процесса размыва и отложения наносов; показатель изменчивости размеров размыва и аккумуляции около своих устойчивых значений – средних величин эрозии дна и отложения наносов на дне моря.

Дисперсия имеет размерность квадрата изучаемой величины, в данном случае  $m^2$ . Поэтому для оценки вариации значений размыва и намыва около среднего значения удобнее пользоваться другой неслучайной характеристикой - среднеквадратическим отклонением. Изменчивость средних квадратических значений вдоль канала, показана в шестой строке табл.2.

Средний слой отложения наносов на дне составляет для всего района величину 0.2647м за три месяца 2001г. При исключении участка раструба, примыкающего к Керчь - Еникальскому каналу (участок 5000-5820м), средний слой накопления наносов на исследуемой площади дна залива составляет 0.2684м и изменяется по пяти участкам на величину  $\pm 2$ см.

Исключение, в данном случае, площади раструба обусловлено тем, что район раструба и дно Керчь – Еникальского канала находятся под воздействием реверсивных течений в Керченском проливе, обусловленных водным обменом между Азовским и Черным морями. Эти течения для Керченской бухты являются воздействиями

внешними, - они индуцируют возникновение циркуляций в бухте. Это всего лишь предположение, требующее натуральных наблюдений за изменчивостью циркуляционных течений в Керченской бухте.

Таблица 2 - Изменчивость средних значений размыва (-) и намыва (+) грунтов дна (м) вдоль подходного канала КМТП и средних квадратических отклонений отметок дна (м) по данным промера в августе и ноябре 2001г.

Участок вдоль канала, м	0-1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-5820
Размыв, м	-0.2656	-0.3178	-0.3770	-0.2236	-0.1758	-0.2328
Намыв, м	+0.2554	+0.2602	+0.2814	+0.2746	+0.2706	+0.4788
Намыв минус размыв, морф.дн.	0.521	0.578	0.6584	0.4982	0.4464	0.4788
Намыв+размыв, бюджет	-0.0102	-0.0576	-0.0956	+0.051	+0.0948	+0.0132
Ср.квдр. отклонение, м	0.233	0.296	0.295	0.237	0.180	0.178
Коэф. асимметрии	+0.385	+0.006	+0.415	+0.581	+0.372	+0.032

Время накопления наносов на дне определяется промежутками между штормовыми периодами, когда скорости течений в бухте меньше размывающих. Это с одной стороны. С другой, длительность накопления наносов определяется также гидравлической крупностью взвешиваемых частиц и длительностью процесса осаждения, глубиной. Средние глубины участка раструба превышают 9м, в районе подходного канала такие глубины встречаются только на участке трассы канала. На забровочных пространствах, примыкающих к каналу, глубины от 4 до 5м. Ясно, что время осаждения наносов на дно, при глубине 4-5м, для частицы одной и той же гидравлической крупности будет в два раза меньше, чем в районе раструба. Мутность вод в этой части бухты визуальна значительно меньше. Мощность вдольбереговых потоков наносов в районе раструба, за мысами Ак-Бурун и Змеиный, больше, чем в самой Керченской бухте. Об этом свидетельствуют Церковная банка, расположенная севернее бухты, и интенсивно развивающаяся южнее бухты Аршинцевская коса.

Среднее квадратическое отклонения процессов аккумуляции и размыва, для всего участка района канала включая раструб, равно 0.2365м – величина сравнимая со средним размером деформаций дна моря.

Тренд дисперсии между соседними километровыми участками незначительный и объясняется случайными причинами. Механизмы формирования рельефа дна на этих участках существенных различий между собой не имеют – разница дисперсий между соседними километровыми участками объясняется случайными причинами: мелкомасштабной нестационарностью процессов размыва и накопления наносов на дне в осенний период и т.д.

Рассмотрим более крупные масштабы. Оценим изменение дисперсии на расстоянии 2км. Ряд дисперсий будем сравнивать теперь через один участок (третья строка табл. 3);  $\sigma^2_{x1}$  и  $\sigma^2_{x3}$ ,  $\sigma^2_{x2}$  и  $\sigma^2_{x4}$  и т.д. Между участками 2000-3000 и 4000-5000м получим эмпирическое соотношение дисперсий равным  $0.0780/0.0324=2.685$ , что больше табличного 1.94.

Таблица 3 - Проверка тренда дисперсии методом Фишера на участке вдоль подходного канала КМТП

Участок вдоль канала, м	0-1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-5820
СР. кв. откл. $\sigma_{,m}$	0,233	0,296	0,295	0,237	0,180	0,178
Дисперсия, $(\sigma_g)^2, m^2$	0,0543	0,0876	0,0870	0,0562	0,0324	0,0317
Отношение $F = \sigma_{xi}^2 / \sigma_{xi+1}^2$ при $\sigma_{xi}^2 > \sigma_{xi+1}^2$	1,65	1,01	1,55	1,73	1,02	
Табличные значения критерия Фишера, при $n=25, \alpha=0,10$	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	

Следовательно, в районе между вторым и четвертым километром вдоль канала наблюдается смена механизмов накопления наносов и размыва дна в период сентябрь - ноябрь 2001 . Это подтверждается также не случайностью средних величин деформаций на этом участке, а также сменой процесса размыва на аккумуляцию наносов на дно, наличием тренда дисперсии на этом двухкилометровом участке. Положительная и отрицательная статьи бюджета наносов, выраженные в слоях (м) намыва и размыва дна, разнятся между собой на величину пренебрежимо малую +0.00106м. Таким образом, есть все основания полагать, что канал и забровочные пространства заносятся грунтами поступающими извне. Уравновешивается этот положительный баланс транзитной частью взвешенных наносов, некоторой частью взвешиваемых на этом участке наносов, поступающих в толщу воды в результате эрозии дна, а также той частью грунтов, которая, оказавшись в толще воды, не успевает осесть на дно за время транзита и составляет отрицательную часть бюджета наносов.

Неясным остается механизм доставки наносов на эти участки, доли взвешенных и влекомых наносов и пр., это, во-первых. Во-вторых, закономерности распределения положительных и отрицательных мелкомасштабных форм рельефа по площади изучаемого района тоже неясны.

Превышение размыва в начале канала, а аккумуляция в его конце, говорит о том, что в Керченской бухте, вероятно при нагонах, у дна, возникают компенсационные течения. Скорости этих течений превышают размывающие. Эти течения могут иметь картину своеобразных разрывных течений. Механизм таких течений практически не изучен.

Коэффициент асимметрии является показателем скошенности, несимметричности функции плотности вероятности случайного процесса. Для нормального закона распределения он равен нулю. Средний коэффициент по всей его длине равен 0,30. В двух случаях, на участке 1000-2000м и 5000-5820м, коэффициенты асимметрии близки к нулю - 0,006 и 0,032. Можно полагать, что в районе этих площадей наблюдается гауссовский процесс деформации дна. Другие коэффициенты асимметрии положительные, изменяются от 0,38 до 0,58 и существенно меньше коэффициентов вариации. Поэтому можно полагать, что они дают незначительную положительную асимметрию. При оценках свойств можно, вероятно,

считать и в этих случаях, что мы имеем дело также с проявлением гауссовского процесса.

В связи с этим можем записать функцию плотности вероятности нормального закона для процессов деформации дна в этом районе Керченской бухты. При известной оценке математического ожидания равной 0,26м, среднем квадратическом отклонении 0,24м и дисперсии 0,057м<sup>2</sup> имеем

$$f(\Delta h) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\Delta h_i - \Delta h_{cp})^2}{2\sigma^2_{\Delta h}}\right\} = 1,67 \exp\left\{-\frac{(\Delta h_i - 0,26)^2}{0,155}\right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta h_i$  - измеренные разности отметок дна по двум последовательным промерам.

Соотношение (2) - оценка вероятностного закона деформации морского дна в Керченской бухте в осенний период 2001 года, представляет собой соотношение между размером деформации  $\Delta h$  (м) и вероятностью ее возникновения.

**Выводы.** Разработан статистический метод исследования деформаций морского дна, используемый для оценки бюджета - эрозии и накопления морских грунтов по данным промера, учитывающий интегральный результат взаимодействия элементов системы «атмосфера-гидросфера-литосфера», результатов перемещения и отложения наносов, - метод является наиболее приемлемым при анализе многофакторного процесса деформации.

Бюджет наносов в осенний период 2001 года, на участке подходного канала КМТП в Керченской бухте, положительный. Аккумулированный слой наносов на дне равен 0.032м, а объем - 74576м<sup>3</sup>. Проходные глубины уменьшились в среднем на 0.26м, глубины лимитирующие судоходство - на 0.49м находятся в районе раструба подходного канала. Наиболее значительные размывы отмечаются на стенках правого откоса канала на участке 1000-3000м, а аккумуляция - на стенках и левого и правого откосов на участке 1000 - 3000м. Эти величины достигают максимальных значений (-1.70м) и (+1.60м).

Устойчивое местоположение участков размыва дна и отложения наносов - процесс не случайный и может рассматриваться в районе, как благоприятный для принятия обоснованных инженерных решений по защите подходного канала КМТП от заносимости.

### Список литературы

1. Великанов М.В. Движение наносов. - М.: Изд-во министерства морского флота СССР.1948.-210с.
2. Гончаров В.Н. Движение наносов. - Л.: Главная редакция строительной литературы. 1938.-312с.
3. Гришин Н.Н. Механика придонных наносов. - М.: «Наука». 1982.-160с.
4. Анциферов С.М., Косьян Р.Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. - М.: «Наука».1986.-224с.
5. Руководство по методам исследования и расчетов перемещения наносов и динамике берегов при инженерных изысканиях. - М.: Гидрометеиздат.1975.-239с.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. - М.: «Мир».1974.- 464с.

### Статистична оцінка бюджету наносів ділянки Керченської бухти і заносимості підхідного каналу Керченського морського торговельного порту (КМТП). Ілюшин В.Я.

Запропонований статистичний метод оцінки деформації морського дна за даними проміру глибин. Інтегральна оцінка бюджету дана за наслідками ерозії дна і осадження наносів. Виявлені ділянки найбільшої заносимості морського каналу, оцінені критичні прохідні глибини.

**Ключові слова:** бюджет наносів, деформації морського дна, ерозія дна, акумуляція, морський канал, заносимість, статистичні характеристики, гауссовський процес.

### Statistical estimation of budget of alluviums of the Kerch bay area and brought of approach channel of Kerch marine auction port (KMAP). Ilushin V. Y.

The statistical method of the estimation of a sea-bottom deformation is offered. Integral estimation of the budget is given according to results erosion of bottom and alluviums precipitating. The areas of most intensive accumulation in marine channel are exposed, the critical communicating depths are appraised.

**Keywords:** budget of alluviums, deformation of sea-bottom, erosion of bottom, accumulation, sea-channel, brought, statistical descriptions, gaussovski process.