#### Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# А.Н. Павлов

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ЛИТОДИНАМИЧЕСКУЮ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ ДНА В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

(на примере Нарвского залива)



#### УДК 556+551.46

Павлов А.Н. Воздействие волновых течений на литодинамическую и инженерно-геологическую обстановку дна в мелководных акваториях (на примере Нарвского залива). Монография.— СПб.: РГГМУ, 2010. — 99 с.

#### ISBN 978-5-86813-292-6

Рецензент: В.В. Антонов, д-р геол.-минер. наук, проф., зав. кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии СПГГИ (технический университет)

Показаны возможности моделирования литодинамической обстановки и инженерно-геологических условий с целью рациональной и безопасной эксплуатации мелководных акваторий. Исследованы принципы прогноза и управления процессами литодинамики на основе механизма формирования инженерно-геологической обстановки под действием ветровых течений.

Книга предназначена для университетов, где изучаются науки о Земле в аспекте решения прикладных задач литодинамического и инженерногеологического характера.

Pavlov A.N. The action of wind currents on lithodynamic and engineering-geologic situation of the bottom of shallow-water basins (the Narva Gulf as an example). Monograph. – St.Petersburg: RSHU, 2010, – 99 p.

Reviewer: V.V. Antonov, Doctor of Geology, Professor, Head of the hydrology and engineering geology department of St. Petersburg Mining Institute (Technical University)

Possibilities of simulation of lithodynamic and engineering-geologic situation are shown for rational and safe exploitation of the shallow-water basins. Concepts of prognosis and control of the processes of lithodynamics on the base of mechanism of formation of engineering-geologic situation under wind currents are investigated.

This book is intended for state universities, where Geosciences are studied on the base of solution of applied lithodynamic and engineering-geologic tasks.

# ISBN 978-5-86813-292-6

- © Павлов А.Н., 2011
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2011



## Предисловие

В 1990 г. Всесоюзным научно-исследовательским институтом им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) и ПГО «Севзапгеология» при участии кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института им. Г.В. Плеханова была завершена крупная опытно-методическая работа по морскому геокартированию масштаба 1: 200 000 в центральной части Финского залива. Важной составной частью этого исследования являлись три карты по Нарвскому заливу: батиметрическая, литологическая и инженерно-геологическая [6, 7].

Анализ этих работ показал, что хорошим дополнением к ним могли бы явиться исследования возможностей моделирования литодинамической обстановки и инженерно-геологических условий с привлечением данных по силовым полям, являющихся продуктом действия ветровых течений на дно акватории. Такая возможность появилась благодаря разработанной инженером-океанологом П.В. Федоровым программы математического моделирования придонных течений по заданному ветру для мелководных бассейнов.

Автор признателен бывшим сотрудникам кафедры литологии, динамической и морской геологии Ленинградского горного института (ныне СПГГИ (технический университет)) П.В. Фёдорову и Г.Н. Попову за программную помощь и компьютерную обработку исходных материалов, а также аспирантке из Сирии Элизабет Джорджо, принимавшей участие в работе.

Особую благодарность автор испытывает к доктору геол.минер. наук, профессору А.Е. Рыбалко и кандидату геол.-минер. наук, доценту М.С. Захарову за предоставленную возможность использовать их авторские материалы по литологии и инженерной геологии дна Нарвского залива. Без этих данных работа не могла бы состояться.

Кроме того, автор считает своим приятным долгом поблагодарить также сотрудников «ВНИИОкеангеология» доктора геолминер. наук А.И. Айнемера и чл. корр. РАН, профессора Ю.Е. Погребицкого за полезные и конструктивные консультации.

В подготовке рукописи к печати активное участие принимали доцент кафедры гидрогеологии и геодезии РГГМУ В А. Голосовская, выпускница РГГМУ специалист—гидролог А.В. Дмитриева и студентка гидрологического факультета А.Н. Костюк, за что автор искренне благодарит их.

#### Введение

Освоение приморских территорий теснейшим образом связано с задачами литодинамического и инженерно-геологического характера. Вопросы формирования литодинамических и инженерно-геологических условий на таких территориях всегда будут актуальными, поскольку от уровня и качества ответа на них зависит надёжность прогнозов и польза рекомендаций по управлению береговой зоной.

Нарвский залив как конкретный объект исследования представляет интерес в виде прототипа при решении подобного рода задач в соседнем Лужском заливе, где ведутся работы по строительству нового современного порта для Санкт-Петербурга и России.

Цель настоящей работы сводится к построению модели формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе. При этом под литодинамической обстановкой понимается совокупность батиметрических, литологических и инженерно-геологических характеристик.

Главная задача, позволяющая достигнуть поставленной цели, состоит в изучении связей между параметрическими полями придонных течений и полями морфометрических, литологических и инженерно-геологических характеристик. Для того чтобы решить эту задачу, необходимо предварительно построить поля течений и перевести литологическую и инженерно-геологическую информацию в числовые шкалы измерений. И, наконец, следует разработать процедуру исследования связей.

Методика исследований включала в себя математическое моделирование гидродинамических полей, перевод исходной информации масштаба 1: 200 000 в рабочий масштаб 1: 500 000 и перевод классификационной основы литологической и инженерно-геологической карт в числовую. Как методический прием исследования связей использовался тренд-анализ, метод парных корреляций и метод сравнения трендовых полиномов через отношения их коэффициентов.

Для Нарвского залива, как и для большинства структурных гидрологических элементов прибрежных районов Балтийского моря, характерны следующие основные типы течений:

- сезонные дрейфово-градиентные, обусловленные преобладающей системой ветров, температурным и гидрологическим режимом всей акватории;
  - ветровые или дрейфовые течения;
- волновые, включающие колебательную (реверсивную) и прогрессивную составляющие;
- стоковые в местах впадения в залив различных водотоков и, в частности, у Нарвы.

Вообще говоря, результирующее течение следует рассматривать как геометрическую сумму перечисленных составляющих. Именно такая сумма и определяется при инструментальных наблюдениях. Однако инструментальные методы имеют существенные недостатки.

Во-первых, они дают представление лишь о мгновенных значениях направления и скорости течения, и потому для получения достоверной картины требуется проведение режимных наблюдений часто значительной протяженности во времени.

Во-вторых, достаточно точные значения параметров течения могут быть получены лишь с использованием стационарной измерительной аппаратуры.

В-третьих, поскольку течения прибрежной зоны и в целом мелководного залива при существенном вкладе ветро-волновых составляющих приобретают значительную пространственно-временную неоднородность, потребовалась бы организация довольно громоздкой сети измерителей даже на сравнительно малой площади, что для такой акватории как Нарвский залив, вряд ли целесообразно и возможно.

В настоящее время при ограниченности инструментальных определений течений, особенно при таких мелкомасштабных работах, как в нашем случае, для исследования циркуляции вод широкое применение получили различные расчетные методы. Наиболее эффективными из них оказываются те, которые основаны на моделях, учитывающих главные факторы, определяющие циркуляцию в пределах характерных масштабов исследований.

# Раздел I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЙ

# Глава 1 Постановка задачи

#### 1.1. Содержание задачи

Цель настоящей работы сформулирована в её названии. Из неё следует, что предметом исследования является дно залива. Это дно имеет определённое конструктивное устройство, описываемое через морфометрические и литологические характеристики. В геологии эти характеристики имеют классификационную природу. Например, для геоморфологического описания используются такие понятия, как пляж, клиф, затопленная равнина, впадина, возвышенность, гряда и т.д., для литологичесого описания — отложения валунные, галечные, гравийные пески, алевриты и т.п. Литодинамическая обстановка описывается с помощью таких понятий как абразия и аккумуляция, литодинамический поток и др.

Когда говорят о формировании литодинамической обстановки в той или иной акватории, то, как правило, имеют в виду некий механизм, управляющий функционированием дна. В отличие от морфометрических и литологических характеристик, которые можно либо измерить, либо наблюдать и оценить, механизм формирования увидеть невозможно. Это теоретическая конструкция, строящаяся на основе наблюдаемых или измеряемых параметров с помощью определённого логического аппарата.

Логический аппарат может быть самым разным, но, как правило, это разнообразие контролируется рамками известных типов моделей [1, 3, 4]: детерминистических, статистических, стохастических и т.д. Выбор типа моделей и начальная концептуальная конструкция зависят от многих причин и, в частности, определяется возможностями исследователей: уровнем их подготовки, шко-

лой, кругозором, опытом, техническим оснащением, финансированием, сроками работ и т.д. Однако многое зависит от того завершены натурные исследования или их проведение ещё только планируется, а если они уже выполнены, то что это за работы, в каком масштабе и качестве они сделаны.

В нашем случае по Нарвскому заливу мы имеем дело с завершёнными исследованиями в масштабе 1:200 000. Эти работы были проведены коллективами ВСЕГЕИ, СЗПГО и СПГГИ (ЛГИ) с использованием материалов более крупных масштабов. Результаты исследований были оформлены в виде научных отчётов [6, 7].

Поставленная задача решалась на основе этих материалов. В качестве основной исходной информации использовались карты: батиметрическая, литологическая поверхности морского дна и инженерно-геологическая, масштабов 1:200 000.

Использование карт само по себе определяет нашу задачу как двухмерную: есть две пространственные координаты плоскости (x, y), с каждой точкой которой связана та или иная характеристика морфометрическая, литологическая и инженерно-геологическая. Очевидно, что ни о какой литодинамике, а значит, и о формировании литодинамической обстановки в рамках только этих параметров не может быть и речи. Однако ситуация сразу меняется, если нашу координатную плоскость снабдить параметрами силового поля, определяющего процессы абразии, переноса и аккумуляции. Таким полем является поле придонных течений. Но прямой информацией по нему мы, к сожалению, не располагаем.

Тем не менее, положение оказалось не безнадёжным, поскольку к настоящему времени разработаны методы моделирования гидродинамической обстановки. Правда, все виды течений рассчитать не удаётся, но для Нарвского залива этого и не требуется. Здесь вполне можно ограничиться получением прогрессивной и реверсивной составляющих придонных течений волнового происхождения, с которыми связаны транспортировка придонного материала и размыв дна. Конечно, без сгонно-нагонных, плотностных и других видов течений литодинамическая картина не будет достаточна полной, но, тем не менее, модель формирования литодинамической обстановки, построенная с привлечением параметров волновых течений, будет выглядеть достаточно реальной. Для получения характеристик поля придонных течений волнового происхождения мы воспользуемся программой П.В. Фёдорова, помогшего реализовать её для Нарвского залива (см. гл. 3). Решение поставленной в работе задачи было связано с достижением двух результатов:

- 1. Построением модели формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе.
- 2. Разработкой методического образца решения задач такого рода на основе наиболее распространённой геологической информации.

При этом, имея в виду расчётный характер получения гидродинамических параметров и необходимость перехода к цифровой индексации геологической информации, неизбежно связанной со снижением кондиционности исходного материала, пришлось перейти к масштабу 1: 500 000. Таким образом, для решения задачи мы могли располагать следующей исходной информацией, параметризированной в виде чисел в координатной сетке *X*, *У*:

- 1. Отметки дна (координата Z отсчитанная от среднего уровня моря).
- 2. Векторы скоростей придонных *прогрессивных* течений на заданный ветер  $(\overline{V}_n)$ .
- 3. Реверсивные скорости придонных течений также на ветер выбранной силы и направления  $(V_r)$ .
- 4. Литологическая характеристика придонного слоя наносов или пород в соответствии с условными обозначениями к литологической карте масштаба 1:200 000  $(L_i)$ .
- 5. Инженерно-геологическая характеристика дна в соответствии с условными обозначениями к инженерно-геологической карте масштаба  $1:200\ 000\ (I_i)$ .

Формально весь этот материал укладывается в простую схему: каждым двум числам X, Y соответствует набор чисел из параметров  $\overline{V}_p$ ,  $V_r$ ,  $L_i$ ,  $I_i$ . Требуется найти связи между этими числами. По результатам этих связей строится модель формирования, т.е. схема, в которой все названные параметры найдут своё место и образуют систему.

Первое, с чего при такой информации можно было бы начать, — поиски обычных парных корреляций. Но опыт и связанная с ним интуиция подсказывают, что этот путь, наврядли, будет эффективным, поскольку такого рода связи могут не проявиться из-за существенных флуктуаций параметров, возникающих, в частности, в результате свёртывания информации геологических карт.

Известно, что в природе наиболее типичными являются причинно-вероятностные связи. Поэтому естественным подходом к анализу информации является первоначальное её разделение на систематическую и случайную составляющие:

$$(V_r, L_i, I_i)_{x,y} = \delta_{x,y} + e_{x,y},$$
 (1.1.1)

Корреляционные же связи наиболее интересно исследовать отдельно, на уровне трендовой составляющей  $(\delta_{x,y})$  и случайной компоненты (остатка  $\mathbf{e}_{x,y}$ ).

Кроме того, в анализ полезно ввести ещё одну — энергетическую компоненту. Получить её можно из следующих соображений:

- 1. Величина  $\overline{V}_p$  является вектором.
- 2. Скалярное произведение векторов получают, как известно, таким образом:

$$\langle a, e \rangle = |a| \cdot |e| \cdot \cos(a, e)$$
. (1.1.2)

3. Если получить скалярное произведение двух равных векторов  $V_{\rm p}$ , то получим:

$$\langle \overline{V}_p, \overline{V}_p \rangle = \left| V_p \right|^2 \cdot \cos 0 = \left| V_p \right|^2.$$
 (1.1.3)

- 4. Очевидно, что размерность такого скалярного произведения будет  $m^2/c^2$  (в системе СИ).
- 5. Если этот скаляр связать с половиной единицы массы в точке приложения силы, определяющей прогрессивную скорость  $V_p$ , то получим величину кинетической энергии  $(mV^2/2)$  придонного потока  $(E_K)$ , нормированную на (m/2).

#### 1.2. Концептуальная модель

На выбор концептуальной модели формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе принципиальные ограничения накладывает априорная заданность исходной информацией. По существу, это несколько карт одного масштаба и записка к ним в виде отчёта. Задача плоская, режимные наблюдения отсутствуют, силовое гидродинамическое поле расчётное для нескольких выбранных типовых вариантов ветра продуцирующего это поле.

Логическая основа задачи при таких условиях выглядит следующим образом:

- 1. Морфологическое, литологическое и инженерно-геологическое устройство дна залива рассматривается как квазистационарное.
- 2. Эта квазистационарность определяется взаимодействием двух составляющих в механизме функционирования дна как литодинамического объекта:
- Эволюционная составляющая (некая тенденция, временной тренд), приводящая к систематическим, но медленным преобразованиям. Она носит, скорей всего затухающий характер и связана с постепенной выработкой предельной поверхности дна, близкой к поверхности равновесия. Эта поверхность должна отражать геологическую устойчивость Балтийского моря, Финского залива и Нарвского залива как их части. Речь идёт о географической и геологической индивидуальности этих объектов, сохраняющейся на протяжении точно неизвестного, но достаточно длительного промежутка времени, охватывающего послелиториновую историю северо-западного региона Восточно-Европейской платформы. Эти тенденции медленных преобразований без постановки специальных исследований для нас неуловимы, и мы вынуждены говорить о квазистационарности дна и берегов Нарвского залива как объекта антропогенной истории восточной части Балтийского региона. Неуловимость этих изменений позволяет создать конкрентный многопараметрический образ залива, который и закреплён в исходных картах. Это как лицо человека в стандартных условиях, краткосрочное старение которого мы не способны уловить.
- Квазицикличные изменения, связанные с конкретными и сезонными колебаниями гидродинамической обстановки по схеме шторм штиль шторм штиль ... Эти изменения могут быть существенными, но их особенность заключается в их квазиобратимости. Например, специальные работы на полигоне зал. Терпения (о. Сахалин) [3] показали, что за периоды штормов батиметрическая картина дна становится чрезвычайно простой и изобаты, её

изображающие, по существу, превращаются в ровные линии, в целом повторяющие контуры берега.

За этот же период литологическая обстановка предельно усложняется и достигает максимального разнообразия по виду донных осадков. За штилевые периоды ситуация меняется на обратную: батиметрия предельно усложняется, а литологическая обстановка становится очень однообразной. Этот процесс напоминает деформацию лица человека при переходе от спокойного (условно стандартного) состояния к состоянию улыбки, смеха, печали, ужаса и т.д., т.е. к тому, что принято называть мимикой. Однако образ как некая индивидуальность при этом сохраняется, естественно, на фоне длительного временного тренда.

В зал. Терпения квазицикличные изменения были чётко зафиксированы как сезонные на протяжении пятилетних исследований. Очевидно, возможность их обнаружения была связана не только с постановкой сезонных режимных работ, но и с масштабом картирования. Это был полигон около 10 км², на котором регулярно с использованием одних и тех же методик проводились комплексные съёмки масштаба 1:2000. В Нарвском заливе режимные работы не проводились, а масштаб картирования был в 1000 раз мельче. Последнее обстоятельство позволяет вторую, квазициклическую, составляющую механизма функционирования дна не рассматривать. Право на такой шаг ещё более укрепляется, если принять во внимание, что волновая активность в Нарвском заливе существенно слабее, чем в заливе Терпения.

Таким образом, наши возможности в построении концептуальной модели формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе вырисовываются достаточно определённо:

- 1. Это статическая модель, отражающая связи между силовыми характеристиками и параметрами литологическими (с учетом морфометрии и инженерно-геологических свойств осадков).
  - 2. Блок-схемы модели показаны на рис. 1.2.1, 1.2.2.

Блок-схемы достаточно просты и, навряд ли, требуют какихто особых пояснений. Можно только обратить внимание на то, что на рис. 1.2.1 сдвоенные стрелки  $\Rightarrow$  относятся к математическому моделированию поля течений  $(V, \overline{V_p}, V_r)$ , по заданному ветру (W) и продуцируемому им волнению  $(A_w)$ , а простые стрелки  $(\to \to)$ 

отражают, как правило, (но не всегда) парные корреляции между параметрами. Направления этих стрелок говорит о физическом направлении связи. Например, трендовая литологическая поверхность имеет прямую и обратную связь с морфометрией дна, прямо влияет на инженерно-геологические свойства, но инженерно-геологические свойства не определяют литологический состав.

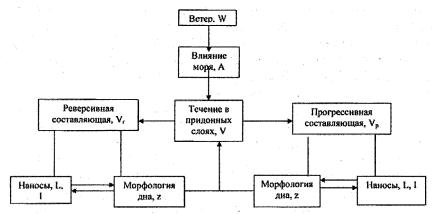


Рис. 1.2.1. Общая блок-схема идеи.

Обозначение  $\left|V_{p}\right|$  говорит о том, что построения проведены по скалярной части вектора  $\overline{V}_{p}$ . Величина  $E_{k}$  — кинетическая энергия в точке приложения силы придонного течения от его прогрессивной составляющей  $\overline{V}_{p}$ , полученная как половина скалярного произведения этого вектора самого на себя ( $E_{k}$  нормирована на половину единицы массы). Формально  $E_{k}$  и  $\left|V_{p}\right|$  очень близки, поэтому предполагается связи  $\mathbf{e}_{E_{k}}$  и  $\mathbf{\tau}_{E_{k}}$  с соответствующими характеристиками по Z, L и I рассмотреть через  $\mathbf{e}\left|V_{p}\right|$  и  $\mathbf{\tau}\left|V_{p}\right|$ , что и отражено на рис. 1.2.2.

Очевидно, что техническая сторона решения нашей задачи теперь сводится к параметризации исходной информации в масштабе 1:500.000 и математическому оформлению каждой стрелки на блок-схеме рис. 1.2.2.

В завершение работы эту формализованную модель следует офизичить, т.е. тому физическому содержанию, которое мы вложили в концептуальную схему, следует придать более строгий и в меру возможностей количественный смысл.

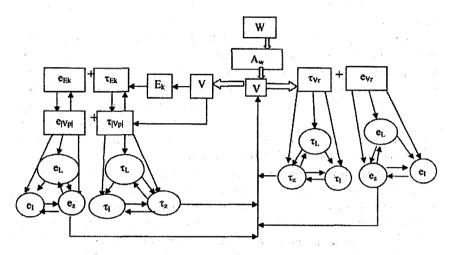


Рис. 1.2.2. Блок-схема формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе (детализированная структура).  $\tau$  – тренд, е – остаток.

## 1.3. Вопрос о начальных условиях

Всякое стремление построить количественную модель происходящих событий связано с необходимостью, так или иначе, оформить представления о начальных и граничных условиях области исследования. В нашем случае такой областью является Нарвский залив, представляющий собой структурный элемент Финского залива Балтийского моря.

Поставленная задача связана с исследованием воздействия гидродинамического поля придонного слоя водных масс залива на формирование геометрии его дна, т.е. морфологических особенностей, а также на формирование литологической обстановки и инженерно-геологических условий. Таким образом, исследуемая область является многопараметрической. Выбранный нами уровень решения не детерминистический, а предлагает лишь выявление формальных связей между параметрами силовых и энергетических полей гидродинамического содержания и параметрами геологиче-

ского характера. Поэтому, говоря о начальных условиях, следует говорить о распределении на морском дне и в его окрестностях по координате Z всех участвующих в задаче параметров на выбранный начальный момент времени  $t_0$ .

Таких моментов может быть два:  $t_{01}$  и  $t_{02}$ . Момент  $t_{01}$  — это геологическая дата, фиксирующая появление Нарвского залива как самостоятельной гидрографической структуры. Момент  $t_{02}$  — это некоторая, вообще говоря, неизвестная дата, на которую литологические и инженерно-геологическое состояние дна Нарвского залива, его морфология, а также особенности ветрового режима на нём практически не отличались бы по показателям от даты завершения исследований, т.е. от 1990 г. Нетрудно понять, что в случае принятия второго варианта (выбора начального момента  $t_{02}$ ) предполагается гидродинамическая квазиустойчивость всей системы вода—дно.

Иными словами, в случае  $t_{02}$ , речь идёт о равновесном состоянии, когда гидродинамические поля придонного слоя водных масс ничего не изменяют в литологическом и инженерно-геологическом устройстве дна залива, а лишь обеспечивают и трактуют это устройство, поддерживая его таким, каким оно зафиксировано на момент исследования (в выбранном масштабе  $1:500\ 000$ ).

Таким образом, мы видим, что выбор начального момента зависит от цели нашего исследования. Если мы хотим реконструировать изменение и развитие литологической и инженерногеологической обстановки на дне Нарвского залива к моменту исследований, то мы должны обсуждать начальные условия на момент  $t_{01}$ , т.е. входить в реконструкцию геологических событий, предшествующих появлению залива. Нетрудно понять, что это чисто геологическая задача.

Нас же больше интересует прикладной аспект: описать существующую ситуацию как обстановку некоторого динамического равновесия, с тем чтобы на этом, в каком-то смысле условном фоне, прогнозировать его изменения при различного рода строительных и других формах вмешательства цивилизации в сложившуюся природную обстановку. Иными словами, нас интересует задача прогноза и управления. Геологическая же история дна залива может рассматриваться как некий тренд природного происхождения.

Такой тренд полезно знать. Кратко опишем его, опираясь на результаты исследований ВСЕГЕИ, СЗПГО «Севзангеология» и СПГГИ [6, 7]. Геологическая история Нарвского залива является частью геологической истории южного склона Балтийского щита, достаточно подробно изложенной в литературе.

Формирование плитного чехла на южном склоне началось с позднего венда и в колебательном ритме продолжалось в течение всего палеозоя. На протяжении мезозоя-кайнозоя здесь доминировали процессы денудации, в результате которых в плитном чехле была выработана система глинтов — отступающих от щита уступов.

Преобладание в дочетвертиной истории денудационных процессов привело к формированию двух структурно—денудационных поверхностей. Нижняя представляет собой цокольную равнину, возникшую на складчатом основании кристаллических пород, верхняя — это пластовая равнина, сформировавшаяся на моноклинально залегающих осадочных породах. Разделены эти поверхности чётко выраженным в рельефе уступом (глинтом), являющимся, по существу, границей плитного чехла.

Геологическое развитие региона в четвертичный период определялось функционированием покровных ледников. Не вдаваясь в детали этих геологических событий и тем более в полемику вокруг них, отметим лишь принципиальные события этой части геологической истории Финского залива, гидрографической частью которого является объект нашего исследования:

- 1. Начало четвертичного периода эоплейстоцен широкое развитие покровного оледенения.
- 2. Начало мезоплейстоцена значительное потепление (лихвинская межледниковая эпоха) и, как результат, появление обширных водных бассейнов, частью которых являлась и территория современного Финского залива.
- 3. Конец мезоплейстоцена ознаменовался днепровским оледенением (от 110000 до 190000 лет до н.э.), охватившим огромную территорию.
- 4. Деградация днепровского ледника привела с гляциоэвстатической трансгрессии, и территория Финского залива оказалась в пределах обширного морского холодноводного бассейна.
- 5. Последующее московское оледенение котловину Финского залива вновь заполнило льдом.



- 6. Неоплейстоцен начался с крупного потепления. С ним было связано так называемое микулинское межледниковье. Финский залив опять вошёл в состав морского бассейна, оставившего после себя мгинские отложения (устье р. Луги, древняя долина р. Невы и др. районы).
- 7. Валдайское оледенение (от 70 000 до 25 000 лет до н.э.). Характер этого похолодания трактуется специалистами неоднозначно. Но даже сторонники так называемой безлёдной гипотезы не отрицают, что в северных и северо-западных частях Русской равнины ледниковый покров существовал, а значит, Финский залив вновь оказался под ледником.
- 8. В средневалдайскую эпоху (50–25 тыс. лет до н.э.) деградация ледника привела к образованию обширного бассейна озёрного типа.
- 9. Поздний валдай (лужское оледенение около 24 тыс. лет до н.э.) новое похолодание привело опять к перекрытию Финского залива ледником.
- 10. Деградация лужского ледника окончательно освободила Финский залив, в том числе и территории Нарвского залива от ледникового покрова (приблизительно 14 тыс. лет до н.э.).
- 11. Последующие стадиальные оледенения проникали только в более западные районы и влияли на Нарвский залив лишь косвенно.

Чередование ледниковых и межледниковых эпох в четвертичной истории северо-западного региона определяло новую цикличность его геологического развития:

- в ледниковые эпохи преобладали процессы экзарации;
- с наступлением межледниковья основными процессами становились процессы моренной аккумуляции с последующим наложением на них водно-ледниковой эрозионно-аккумулятивной деятельности последующих потоков и озёр, завершавшейся интенсивным морским морфолитогенезом.

Каждое новое оледенение начиналось с уничтожения большинства предшествующих аккумулятивных образований. Таким образом, почти на всём протяжении четвертичного периода на территории Финского залива в основном должны были сохраниться следы экзарационных процессов. Действительно, в Нарвском заливе выявлен целый набор форм коренного рельефа, явившихся результатом интенсивной экзарации и эрозии талыми ледниковыми водами [6]: возвышенность о. Б. Тютерс, погребенные долины, гляциодислокации и ледниковые отторженцы.

После деградации лужского ледника геологическая история Нарвского залива определялась историей тех водных бассейнов, которые и были прародителями современного Балтийского моря: Балтийского ледникового озера (14—15 тыс. лет до н.э.), Иольдиевого моря (около 13 тыс. лет до н.э.), Анцилового озера (около 9—7,5 тыс. лет до н.э.), Литоринового моря (около 7,5—7 тыс. лет до н.э.).

Смена морских и озёрных режимов, в свою очередь, определялась колебательными процессами в районе так называемых Датских проливов. Открытие проливов связало Балтику с Атлантическим океаном, и она становилась морем, закрытие проливов превращало её в озеро. Уровень последнего Литоринового моря был выше современного на несколько метров, а солёность больше, что связывается с развитием эвстатической трангрессии Мирового океана в среднем голоцене.

В суббореальное и субатлантическое время на фоне небольших колебаний происходило общее снижение уровня моря, приведшее в конце голоцена к условиям, близким к современным (по положению береговой линии и фациальной зональности).

Итак, выбранное нами начальное состояние Нарвского залива, состояние на некоторый момент  $t_{02}$ , сформировалось на протяжении длительного временного интервала, основными событиями в котором были:

- становление цокольной и пластовой равнин с целой системой региональных уступов глинтов;
- формирование на них разнообразного комплекса экзарационных и эрозионно-аккумулятивных форм многочисленных циклов оледенения межледниковья;
- наложение на всё это эрозионно-аккумулятивной деятельности крупных водных бассейнов, явившихся прародителями современного Балтийского моря.

Описание этих условий будет дано в главе 2 п. 2, 3, 4.

frager in the William State (Co.)

#### 1.4. Вопрос о граничных условиях

Имея в виду, что решаемая задача относится к категории плоских задач, а вся рассматриваемая морфолитологическая система принята нами квазистационарной. О границах дна Нарвского залива и условиях на них можно сказать следующее:

- 1. Мощность слоя наносов находящихся под воздействием силового поля придонных течений  $\Delta z_L \Rightarrow 0$
- 2. Нижняя граница такого условного слоя в функционировании самого слоя участия не принимает и является неподвижной.
- 3. Боковые границы, представляющие собой береговую линию, также жёстко закреплены и, если говорить о граничных условиях второго рода, то на этой линии q=0 (расход воды в сторону или со стороны рассматриваемого объекта). Нетрудно понять, что работой рек и ручьёв при этом приходится пренебрегать. Мы как бы останавливаем мгновение, в которое фиксируется лишь скорость природных течений, как бы «вмороженные» в точки приложения силы этих течений.
- 4. Верхняя граница это раздел между водной массой залива и его дном. Принимая, что эта граница не имеет мощности (толщины), а представляет собой математическую поверхность, силовое поле придонных течений, воздействующих на дно залива, также примем двухмерным, сведя его мощность  $\Delta z_A \Rightarrow 0 \Rightarrow 0$ .
- 5. Очевидно, что на этой границе, т.е. на нашей морфологической поверхности граничные условия второго рода окажутся уже q(x,y). Но поскольку мы оперируем не объёмами, а поверхностями без толщины, расход потока q(x,y) превратиться в скорость (V):

$$q_x = V_x(\Delta x, \Delta z)$$

$$q_y = V_y(\Delta y, \Delta z)$$
(1.4.1.)

при 
$$\Delta z = 0, q \Rightarrow \overline{V} \Rightarrow \overline{V} (x, y)$$
 (1.4.2.)

При постановке задачи мы пришли к тому, что придонные скорости, вводимые в условия, имеют только волновое происхождение, а само волнение продуцируется ветрами. В модели П.В. Фёдорова, которой мы воспользуемся, скорость ветра  $W={\rm const},$  так же как и азимут его направления  $\alpha={\rm const}.$  Подробней граничные условия для этой модели будут рассмотрены в главе 3.

#### 1.5. Основные параметры и шкалы измерений

Общее количество параметров, которое используется в нашей задаче, весьма велико, если иметь в виду, что при свёртывании информации батиметрической карты с масштаба 1:200.000 до масштаба 1:500.000 мы перешли на точечные значения глубин по исходной сетке 3х3 км, а литологическую и инженерно-геологическую информацию списали по сетке с детальностью 2х2 км, причём эта информация была уже многопараметрической в соответствии с легендами этих карт. Добавим сюда ещё несколько карт по придонным течениям, построенным на основе математического моделирования.

Однако по способу представления всех этих параметров нам удалось уложиться в три типа шкал из четырёх существующих в науке [2]. Для того чтобы подчеркнуть важность этого вопроса, приведём цитату из книги Дж. С. Дэвиса:

• «Учёный, исследующий Землю, должен не только понимать геологический смысл записываемых переменных, но также чувствовать математический смысл используемых шкал измерений. ... Измерение — это приписываемое наблюдению число, отражающее величину или значение некоторой характеристики. Способ, которым наблюдению приписываются численные значения, определяет шкалу измерений». [2, с.14–15].

Батиметрия (параметры Z) и характеристики полей придонных течений (параметры V,  $\overline{V}_p$ , V,  $\overline{V}_p$ ,  $V_r$ ,  $V_r$ ,  $E_k$ ) даются в шкалах отношений, имеющих истинную нулевую точку и одинаковые приращения между отдельными градациями. Например, батиметрическая отметка (глубина) 40 м в два раза превосходит глубину 20 м, а глубины отсчитываются от среднего уровня моря как нулевой поверхности. Координаты X, Y измерялись в интервальной шкале, в которой длина последовательных интервалов одинаковая, но начало координат выбрано произвольно (все цифровые карты масштабов 1:500.000 строились по условно заданной ортогональной сетке).

Как видим, шкала отношений и шкала интервальная отличаются выбором нуля. А вот литологическая и инженерно-геологическая информация ни в одной из этих шкал представлена быть не может. Для этих карт мы можем использовать лишь номинальную

шкалу или шкалу иерархическую. Номинальная шкала строится на взаимно исключающих друг друга категориях одинакового типа. Очевидно, что условные обозначения литологической и инженерно-геологической карт могут быть переведены в эту шкалу, поскольку такие элементы условных обозначений, как отложение валунные, валунно-галечные, галечные, гравийные и т.п. (литология), различные категории пород особого состава и свойств, породы малой степени литификации, группа смешанных пород несвязных и мягких и т.п. (инженерная геология) могут быть просто идентифицированы любыми случайными числами.

Однако условные обозначения литологической и инженерногеологической карт имеют определённую внутреннюю ранжировку. Например, в литологической легенде определяется чёткий порядок от коренных пород к обломочным, а среди обломочных от крупнообломочных (валунных) к пескам и песчано-глинистым алевритам (см. табл. 1.5.1). В инженерно-геологической легенде ранжировка иная (см. табл. 1.5.2.).

Таблица 1.5.1. Условные обозначения к литологической карте поверхности морского дна Нарвского залива [По карте ВСЕГЕИ, СЗПГО масштаба 1:200.000, 1990 г. Авторы: А.Е. Рыбалко, В.А. Жамойда и др.]

І. Подводные выходы	0 – аргиллитизированные глины: глинистые песчанки;		
подстилающих пород	ленточные и ленточноподобные глины;		
	1 – валунные;		
	2 – валунно-галечные;		
II Envisor Services	3 – галечные;		
II. Грубообломочные	4 – гравийно-галечные;		
гинэжопто:	5 – гравийные;		
	6 – гравийные с песком;		
	7 – пески с гравием;		
	8 – крупнозернистые;		
	9 – среднезернистые;		
	10 - мелкозернистые;		
ter in the state of the state of	11 - существенно крупнозернистые;		
graph to the graph of the control of	12 - существенно мелкозернистые;		
III. Пески:	13 – глинистые пески;		
	14 – алевритистые пески;		
**	15 – алевриты, песчаные алевриты;		
	16 – глинистые алевриты, песчаные глины;		
	17 – глины, алевроглины (пелиты, алевропелиты);		
	18 – песчано-глинистые алевриты (смешанные осадки).		

# Условные обозначения к инженерно-геологической карте дна Нарвского залива [по карте ВСЕГЕИ, ЛГИ масштаба 1:200.000, 1990 г. Авторы: М.С. Захаров, Т.Н. Францева, И.А. Курныгин]

	axapos, 1.11. Thankesa, 11.14. Nyphin hij
П. Породы особого состава, состояния и свойств, требующие специальных методов инженерной подготовки для хозяйственного использования и строительства.      П. Породы малой степени литификации вязкопластичной и текучепластичной консенстенции.	<ul> <li>1 – газонасыщенные илы;</li> <li>2 – высокоглинистые однородные илы (тонкие пелиты) с глубоководной слоистостью;</li> <li>3 – глинистые и алевроглинистые илы (пелиты, алевриты, алевропелиты) монотонные, полосчатые, пятнисто-полосчатые;</li> <li>4 – глинистые и песчанистые илы правильно и незакономерно переслаивающиеся (пелиты, алевритистые пески);</li> <li>5 – волновые и волновые-течениевые фации современных морских осадков;</li> <li>6 – пески серые, зеленовато-коричневато-серые, от мелкозернистых до грубозернистых, различной степени сортировки и отмытости, иногда слабоглинистые;</li> <li>7 – пески с дресвой, гравием, галькой;</li> <li>8 – озёрные анциловые глинистые осадки с различными по форме включениями гидротроилита;</li> <li>9 – озёрно-ледниковые балтийские глинистые осадки монотонные, с намечающейся слоистостью, иногда с включениями органического вещества;</li> <li>10 – озёрно-ледниковые балтийские глинистые осадки, слоистые и ленточноподобные;</li> <li>11 – озёрно-ледниковые балтийские алевро-глинистые осадки, существенно неоднородные;</li> <li>12 – озёрно-ледниковые алевро-глинистые осадки,</li> </ul>
	монотонные или ленточно-слоистые различно- го типа;
III. Группа смешанных пород – рыхлых несвязных и мягких связанных различной плотности	13 – озёрно-ледниковые осташковские отложения. Тонкослоистое переслаивание, незакономерное чередование (грубое переслаивание) песков, глин, песчанистых глин;
IV. Глинистые породы высокой степени уплотнения с незакономерными включениями обломочного материала.	14 – ледниковые осташковские отложения, пре- имущественно супесчано-суглинистые (глины песчанистые, пески глинистые) с включения- ми гравия, гальки, валунов;
V. Сложный комплекс глинистых пород высокой степени литификации с переходом в породы полускального типа.	15 — аргеллиты, аргеллито-подобные серо-зеленые глины, прослои песчаников, существенно затронутые в верхней части гляциодислокациями.

Естественно, что при использовании тренд-анализа иерархическая шкала даст результаты физически более наглядные и понятные, чем шкала номинальная. В соответствии с геологической погикой литологическое строение и инженерно-геологическая обстановка одного и того же объекта (в нашем случае Нарвского залива) должны быть согласованными, поскольку инженерногеологические свойства по отношению к литологическим условиям вторичны. Однако из сравнения таблиц 1.5.1 и 1.5.2 видно, что содержание и компоновка информации в них существенно отличаются.

Инженерно-геологическая шкала тесно связана с возрастом отложений и их генезисом, поскольку эти показатели интегрально определяют степень литификации пород, а значит и инженерно-геологические их свойства. Однако ранжировка этой шкалы довольно чёткая: от слабых пород к всё более и более прочным. Очевидно, что построенные по этим шкалам карты, а затем трендовые поверхности и поверхности остатков, будут выглядеть как изолинии с числовыми индексами 0, 1, 2, 3... и т.д. Для литологических построений эти числа покажут порядок перехода от коренных пород к крупнообломочным и далее нарастание механической мелкости осадков через гравийные отложения к песчаным, алевритистым и глинистым. Для построений инженерно-геологических изолиний с таким же порядком смены цифр будут отражать нарастание степени литификации пород и их прочности.

# Глава 2 Исходный фактический материал

#### 2.1. Данные по ветровому режиму

В основу выбора данных по ветровому режиму положена гидрометеорологическая карта Балтийского моря (1985г.). Поскольку ветер нас интересует как фактор, продуцирующий волнение в Нарвском заливе, обсуждение этой информации следует начать с особенностей ледового режима, так как при существовании ледового покрова любой ветер не представляет интереса для нашей задачи. Первый лёд в Нарвском заливе появляется поздно — обычно в конце декабря — начале января, а полное разрушение ледового покрова заканчивается, как правило, в середине апреля. Летний период (июнь—июль) в ветровом отношении относительно спокойный.

Таким образом, наиболее важными для нашей задачи являются весенний (апрель—май) и осенний наиболее длительный период (август—ноябрь). Приведём для этих сезонов информацию по средним и максимальным скоростям ветра для разных направлений:

Значения максимальных скоростей, м/с

Направление, α <sup>0</sup>	Скорость, W	
	весна	осень
0	8	15
45	15	. 8
90	8	15
135	8	15
180	8	15
225	20	15
270	15	. 15
315	8	15

Значения средних скоростей, м/с

Направление, α <sup>0</sup>	Скорость, W	
	весна	осень
0	3,50	6,00
45	6,00	4,50
90	3,75	6,00
135	4,25	6,00
180	4,50	5,50
225	7,00	6,50
270	5,25	6,25
315	4,25	6,75

Нарвский залив является открытым на акваторию Финского залива во всём диапазоне северо-западных румбов от 270 до 360 (0). И поэтому ветры, дующие из этого сектора, наиболее активно формируют волнение. Именно этот сектор обеспечивает наибольшую длину разгона, L.

Для матмоделирования поля придонных течений мы выбрали три ветровые ситуации.

$\alpha^0$	<i>W</i> , м/с	L, km
225	20	65
270	15	450
315	6,75	125

<u>Первая</u> — это юго-западный ветер максимальной силы, наблюдаемый весной. Он интересен тем, что является вообще максимальным ветром в годовом разрезе и уже одно это обстоятельство заставляет нас рассмотреть его, хотя длина разгона волны при этом ветре невелика — всего  $65 \, \mathrm{km}$ .

Вторая ситуация — это западный ветер максимальной силы (максимумы скоростей для него и весной и осенью достигают одинаковых значений — 15 м/с). Важной чертой для этого направления является максимальная длина разгона волны —  $450 \, \text{км}$ .

Третья ситуация — это средний ветер северо-западных румбов (315°), при котором длина разбега достаточно велика — 125 км. Эта ситуация позволяет нам оценить действие некоторого наиболее сильного среднего ветра на протяжении наиболее длительного периода (август—ноябрь).

Консультации со специалистами гидрометеорологического профиля подтвердили оптимальность сделанного выбора. Перебор дополнительных вариантов по  $\alpha$ , W, L, возможно внесёт некоторые детали в ожидаемые результаты построений, но принципиально навряд ли их изменит.

#### 2.2. Батиметрия и геометрия границ

В основу этого раздела положена батиметрическая карта Нарвского залива масштаба 1:200 000, составленная Б.Н. Морозовым [6]. Изобаты на ней проведены через 10 м и дана цветовая шкала через 20 м: 0–20, 20–40 и т.д. Максимальная глубина в заливе достигает 91 м и связана с небольшой впадиной в 2–3 км к запа-

ду от о. Бол. Тютерс. На большей части залива преобладают глубины до 40 м. По устройству поверхности дна территорию залива условно можно разделить на две части: северо-западную и юговосточную. Для первой характерен типичный расчленённый рельеф с чередованием крупных валообразных поднятий северозападной ориентации и широких депрессий. У поднятий крутые склоны, вершины осложнены грядами и холмами. Ложбины имеют ассиметричный поперечный профиль. В юго-восточной части дно залива носит преимущественно выровненный характер, его поверхность слабо всхолмлена и полого наклона, расчленение её незначительно. Такое строение рельефа в значительной мере предопределено историей геологического развития залива (см. главу 1 п. 1.3), в частности, расположением в его пределах границы между цокольной равниной, возникшей на складчатом кристаллическом фундаменте и пластовой равниной, сформировавшейся на моноклинальных структурах осадочного чехла. Эта граница в виде первичного глинта в результате деятельности послеледниковых процессов к моменту  $t_{02}$  была существенно изменена и усложнена вторичными уступами и ложбинами. Однако его генеральная ориентация с юго-запада на северо-восток сохранилась.

В работах [6] современный субаквальный рельеф делится на три типа:

- 1. Рельеф, созданный за счёт осаждения осадков из взвеси (бассейновая аккумуляция).
  - 2. Рельеф, созданный волновой деятельностью.
  - 3. Рельеф абразионно-аккумулятивного происхождения.

Первый тип занимает обширные площади и образовался как за счёт продуктов размыва донных осадков, так и за счёт обломочного материала, поступающего с суши на участки с относительно спокойными гидродинамическими условиями. Это практически плоские субгоризонтальные или слабонаклоненные равнины с редкими превышениями, как правило, не более 1–3 м. Такие равнины формируются на различных батиметрических уровнях, но наиболее характерны для средних глубин. Самая крупная из них расположена на глубинах 20–40 м в юго-восточной части залива. В то же время более глубокие ложбины не всегда относятся к рельефу бассейновой аккумуляции. Например, в северо-западной части залива на глубинах 50–70 м сохранились озёрно-ледниковые

равнины, что принято объяснять интенсивной придонной гидродинамикой и возможным дефицитом обломочного материала.

Активная же бассейновая аккумуляция на юго-востоке (20–40 м) связывается с обилием терригенного материала, поступающего со стороны р. Нарвы, и относительно простым начальным рельефом, исключающим появление локальных придонных струй с размывающими скоростями.

Итак, изначально простой рельеф, даже при относительно небольших глубинах, создаёт условия благоприятные для развития аккумуляционных процессов. Сильная изначальная изрезанность дна способствует формированию сложной гидродинамической обстановки в придонном слое, ещё более усложняющей первоначальный рельеф и создающей его генетическую пестроту.

Волновая деятельность формировала рельеф с помощью абразии и аккумуляции. Абразионные процессы преобладали на мелководьях, и в условиях Нарвского залива в основном воздействовали до глубин порядка 20м. Аккумулятивные волновые формы занимают небольшие площади и находятся в юго-восточной части залива на глубинах 10–20 м, представляя собой плоские субгоризонтальные горизонтальные поверхности. Это продукт переотложения песков, подстилающих морену, а также интенсивного вдольберегового потока наносов, двигающегося с запада на восток со стороны Эстонии.

Абразионно-аккумулятивный рельеф формируется на участках мелководья с существенно расчленённым рельефом. Здесь положительные формы активно размываются, а отрицательные заполняются продуктами этого размыва. Происходящая при этом общая нивелировка рельефа формирует мелкорасчленённые субгоризонтальные поверхности с небольшими грядами, холмами и западинами. В основном эти формы рельефа развиты на подводном продолжении о. Мощный (северо-восточный угол планшета), а также к югу от о. Б. Тютерс.

В целом можно сказать, что в пределах залива территориально разделены, но по площади развития более или менее уравновешены, две морфологические зоны:

- 1. Преимущественной аккумуляции (бассейновой и придонных течений).
  - 2. Преимущественной абразии (волновой и природных течений).

Разделены они переходной зоной — отсутствия размыва и аккумуляции. Теоретически это означает, что в этой зоне придонные скорости достаточно велики, чтобы аккумуляция не состоялась, но не достаточно сильны, чтобы разрушать поверхность дна. Очевидно, что такое разделение не столько условно с физической точки зрения, сколько с позиций количественных оценок. Иначе говоря, нарисованная картина носит исключительно качественный характер.

Задача, которую мы ставим перед собой, состоит в том, чтобы уменьшить степень качественности, перейдя на анализ количественных связей. В частности, речь пойдёт о том, чтобы роль волновой составляющей придонных течений (реверсивной — размывающей и прогрессивной — транспортирующей) определить более чётко как для средних, так и для максимальных скоростей ветра разных румбов.

Итак, геометрия дна — это геометрия границы, через которую силовое гидродинамическое поле воздействует на литологическую и инженерно-геологическую структуру дна.

В нашей задаче эту геометрию мы рассматриваем как «замороженную» поверхность, определяющую характер приложения сил, но при этом не изменяющуюся под действием этих сил.

К геометрическим особенностям дна как границы приложения волновых гидродинамических сил относится и береговая линия, её форма и ориентация.

Генеральное очертание Нарвского залива напоминает гиперболу вогнутой стороной, обращённую на северо-запад. Таким образом, ветры северо-западных румбов должны вызывать сильные вдольбереговые течения как со стороны Эстонии, так и с севера в зоне восточного берега. Такие течения и ветровой нагон воды со стороны Финского залива как большой акватории должны формировать обратный отток воды в виде сильного придонного течения со стороны устья р. Нарвы. Сильные западные ветры могут стимулировать вдольбереговой перенос по всему контуру залива и формировать струю в направлении о. Мощный. Южные ветры также гонят воду вдоль восточного берега на север. При этом из-за стока воды от южного берега возможны придонные течения компенсационного характера. Ветры северных румбов должны создавать вдольбереговой поток южного направления у восточного берега залива, поток на запад вдоль южного берега и компенсационное течение от южного берега к северу (см. рис. 2.2.1).

Нетрудно понять, что ветер создаёт не только волны и волновые течения на глубинах не более половины длины волны, но при длительности своего действия в условиях таких небольших акваторий, как Нарвский залив способен создавать сгонно-нагонные компенсационные течения у дна, сила и характер которых определяется формой береговой линии.

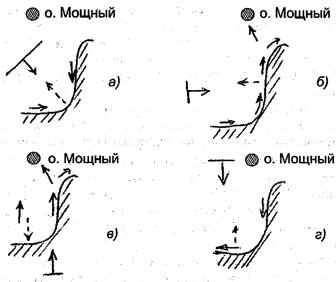


Рис. 2.2.1. Принципиальные схемы возможных течений в Нарвском заливе, вызываемые ветрами северо-западных (а), западных (б), южных (в) и северных (г)

— направление ветра; — направление течений; — компенсационные природные течения сгонно-нагонного происхождения.

#### 2.3. Литологическая обстановка

Описание литологической обстановки приводится как краткие комментарии к литологической карте поверхности морского дна Нарвского залива, выполненной ВСЕГЕИ и СЗПГО в масштабе 1:200 000 [1990 г.] с использованием отчёта по этим работам [6]. В качестве основных таксонов литологической карты были взяты грубообломочные отложения, пески, алевриты, пелиты и промежуточные осадки: глинистые пески и алевриты, песчаные и алев-

ритовые глины, песчаные и глинистые алевриты. Несортированные трёхкомпонентные осадки рассматривались в качестве отложений особого типа, связанные со специфическими условиями осадкообразования.

Таксонометрия строилась на основе треугольной диаграммы, в вершинах которой помещались либо пески (2,0-0,05 мм), алевриты (0,05-0,005 мм), и пелиты (<0,005 мм), либо грубообломные отложения (>2,0 мм), пески и алевро-глинистые отложения (<0,05 мм). Границы гранулометрических классов принимались по Л.Б. Рухину.

Деление грубообломочных материалов проводилось визуально, но также по принципу треугольной диаграммы. Аналитическая основа гранулометрии песчаных отложений составляла более 80%. Средняя обеспеченность карты анализами достигала 65–70%.

Валунно-галечные отложения оказались сосредоточенными на мелководье (до изобаты 10 м), вытянуты вдольбереговой линии и приурочены к вершинам подводных отмелей, имеющих обычно моренный генезис.

Гравийно-галечные и галечные отложения находятся в тесной парагенетической связи с валунно-галечными образованиями, но уступают им по площади. Отдельные выходы галечных пород отмечаются на всех более или менее значительных поднятиях. Наиболее характерны также образования для зоны краевого комплекса к юго-западу от о. Тютерс. К западу количество галечных осадков постепенно увеличивается (до изобаты 15 м). С генетической точки зрения эти отложения могут быть отнесены к делювию, перекрывающему в основном морену.

Гравийные отложения развиты несколько шире, чем галечные. Среди них можно проследить два типа осадков:

- грубо-песчано-гравийные субаркозового состава, совершенно отмытые. Они рассматриваются как современные образования и связываются с действием волновых и придонных течений (глубины 5–30 м). Наиболее широко развиты в западной части планшета к северу от береговой линии.
- несортированные песчано-гравийные осадки с неравномерным распределением обломочного материала. В генетическом отношении они относятся к подводному (морскому) делювию или

палимпсестовым (остаточным) осадкам. Это небольшие тела обычно на периферии отмелей (глубины до 20–25 м).

Пески с гравием и галькой содержат свыше 50% песчаной фракции, а содержание грубообломочных частиц составляет 30—50%. В Нарвском заливе эти отложения развиты достаточно широко, но крупных полей не образуют. Обычно они обрамляют поля, сложенные грубообломочным материалом, а также связаны с отдельными небольшими поднятиями. Мощности этих осадков невелики, они отличаются плохой сортировкой и неравномерной примесью гравийных зерен и гальки. Большинство гравелистых песков являются реликтовыми образованиями (подводным элювием).

Пески являются в Нарвском заливе наиболее распространённым типом осадков и развиты на различных глубинах от 0 до 65м. Большинство песков может быть отнесено к элювию, и образовалось в современную эпоху в процессе размыва дна. Часть из них, по-видимому, являются реликтовыми, принимая во внимание их низкий батиметрический уровень. При картировании пески были расчленены на 5 групп:

- крупнозернистые;
- среднезернистые;
- мелко-зернистые;
- мелко-тонкозернистые;
- разнозернистые, существенно крупно- и мелкозернистые.

Эти группы отражают различные фациальные условия осадконакопления:

- крупнозернистые пески охватывают разности, грубокрупнозернистые, крупнозернистые и средне-крупнозернистые формируют небольшие тела, пространственно коррелируемые с гравелистыми песками и гравием. Их генезис, по-видимому, связан с волновыми течениями или элювиальными процессами. Эта группа песков обычно образует локальные поля в привершинных частях поднятий, а также в мелких депрессиях в неровностях ледникового рельефа.
- к группе среднезернистых песков относятся средне-мелкозернистые, среднезернистые и мелко-среднезернистые. Они образуют небольшие пятнообразные скопления, но распространены шире, чем крупнозернистая группа, в частности, они формируют

чётко прослеживаемый прерывистый пояс вдоль южного побережья Нарвского залива на глубинах 20—30 м. В большинстве своём эти пески имеют реликтовое (элювиальные) происхождение.

- мелкотонкозернистые пески являются ведущим литотипом среди песчаных отложений и занимают более половины площади всех псамитов. Среди них выделяют два типа образований:
  - аккумулятивный, связанный с береговой зоной и глубинами до 10–12 м предположительно волнового генезиса;
  - подводный элювий, развитый на глубинах от 0 до 70 м и образующий широкий шлейф вдоль южного побережья.
- разнозернистые пески имеют относительно широкое распространение. Генетически они связаны с элювиальными отложениями и возникли как сочетание современной мелкозернистой и реликтовой грубообломочной составляющих. Разнозернистые существенно крупнозернистые пески развиты преимущественно до глубин 40 м. Мелкозернистые разности этих песков распространены меньше и развиты преимущественно на периферийных частях мелководий, преимущественно на их склонах. Прослеживаются они на глубинах от 20 до 45 м и, как правило, имеют небольшую мощность.

Алевриты и глинистые пески распространены нешироко и развиты в интервале глубин 25–40 м. На больших глубинах они приурочены к периферии крупных аккумулятивных зон морских голоценовых алевропелитов. Их появление трассирует границу зон голоценового осадконакопления. Алевритистые пески формируют небольшие поля, которые разделяют зоны голоценовой глинистой аккумуляции в южной части Нарвского залива. Глинистые пески ассоциируют с алевропесками и часто окаймляют зоны морских илов.

Песчаные алевриты и песчаные глины в виде узких полос тянутся по периферии алевроглинистых осадков и зафиксированы в южной части залива и на периферии банок. Эти осадки связаны со сменой седиментогенных глинистых фракций голоцена на подводный элювий. Батиметрия этих осадков различна. В южной части это глубины 25–35 м, в северной — они встречаются до глубин 50 м, видимо, в связи с понижением уровня голоценовой аккумуляции.

Смешанные алевропесчано-глинистые осадки присущи зонам ослабленного голоценового осадконакопления, располагающимся

на периферии крупных полей алевроглинистых отложений. Для них характерны глубины более 30 м.

Глинистые алевриты и алевропелиты характерны для зон устойчивого голоценового осадконакопления и, наряду с песками, представляют собой наиболее распространённый в Нарвском заливе литотип. Эти породы занимают все пониженные участки дна. Крупные поля алевропелитов располагаются в южной части залива на глубинах более 30м (у устья р. Наровы они поднимаются несколько выше — до 25 м). К северу верхняя граница голоценовой аккумуляции снижается до глубины 50 м и более. На участках интенсивно расчленённого рельефа встречаются небольшие поля алевропелитов, где они покрывают дно небольших депрессий и поверхности террасовидных уступов.

Литифицированные породы — это подстилающие современные осадки точнее древние осадочные образования. Наиболее крупные их выходы на дне залива встречаются в прибрежной зоне. Это фиолетово-голубые глины кембрия. Они встречаются до глубин 6—8м, на больших глубинах они сменяются обнажениями озёрноледниковых, часто слоистых глин.

#### 2.4. Инженерно-геологические условия

Исходная инженерно-геологическая информация, так же как информация по батиметрии и по литологии, опирается на результаты картирования, выполненного по Нарвскому заливу в масштабе 1:200.000 [5, 6]. Не приводя здесь соответствующей карты, лишь прокомментируем её, опираясь на обстоятельную работу специалистов ВСЕГЕИ, ПТО «Севзапгеология» и СПбГГИ.

Формирование инженерно-геологических условий авторами карты М.С. Захаровым, Т.Н. Францевой и И.А. Курныгиным, представляется следующим образом:

- 1. Свойства покрова рыхлых отложений закладывались в процессе седиментации на протяжении сложной геологической истории всего Северо-Западного региона (глава 1).
- 2. Инженерно-геологические условия контролируются фациальными обстановками. Однако, несмотря на многообразие фаций, они довольно чётко объединяются в три крупных сообщества, отвечающие основным этапам геологического развития гляциально-

го шельфа: максимальному развитию оледенения, деградации ледников и возникновению современных морских бассейнов. Таким образом, на фоне единого ритма трансгрессивного развития гляциального шельфа выделяются три основных комплекса:

- ледниковый;
- ледниково-водный;
- морской.
- 3. Ледниковый комплекс в основном является продуктом наиболее крупного валдайского оледенения. Он сложен отложениями, представляющими собой естественные природные смеси различных фракций горных пород от глинистых до валунов, характеризующиеся высокой плотностью, почти полной водонепроницаемостью, отсутствием предрасположенности к появлению суффогенных процессов, способностью к хорошей уплотняемости под водой в искусственных насыпях.
- 4. Ледниково-водный комплекс это продукт осадкообразования в условиях быстро поднимающегося и колеблющегося уровня моря при гляциоэвстатической трансгрессии, тектоническом и гляциоизостатическом воздымании сущи. Происходил активный перемыв морены, возникновение осадочного бронирующего покрова с накоплением вблизи берегов песчаных осадков, а в глубоководных участках осадков глинистых. Сформировался очень мощный осадочный чехол, практически перекрывший почти всю поверхность подводного рельефа. Характерным признаком этих отложений являются слоистые текстуры, отражающие пульсационные поступления обломочного материала, присутствие типичных ленточных глин. Среди обломочных частиц преобладают тонкие фракции, что выразилось в количественном преобладании среди осадков глинистых и алевритовых образований. Однако сортировка отложений в целом плохая и в них постоянно присутствуют крупные обломки, чаще всего псамитового класса.

Физико-механические свойства пород ледниково-водного комплекса резко изменчивы. Общие закономерности его развития контролируются следующими региональными особенностями осадконакопления:

• типичная морская аккумуляция носит локальный характер (прибрежные песчаные накопления, песчаная аккумулятивная зона

подводных течений, глинистые илы во впадинах и присклоновых участках);

- преобладает так называемая «нулевая седиментация», в результате которой возникли специфические реликтовые образования подводный элювий;
- 5. Морской комплекс отложений отражает полифациальность и потому весьма пёстрый в литологическом отношении. Голоценовая часть осадков более упорядочена, и чаще всего среди этих отложений можно выделить две составляющих: глинистые и суглинистые разности зеленовато-серого цвета внизу, присутствие среди осадков такого же типа гнезд песка и зёрен гравия в верхних слоях. Отложения обогащены органическим веществом, часто газонасыщены и макропористы. Подъём таких осадков на поверхность сопровождается обильным газовыделением.

Среди морских отложений развиты разности формирующиеся в слабовосстановительной среде. Некоторые из них обогащены органическими компонентами, отмечаются горизонты сапропелитовых илов, появляется диагенетическая пятнистость и аутигенные минералы (чаще всего гидротроилит и развивающийся по нему пирит).

Физико-механические свойства этих отложений тесно связаны с их литологическими особенностями и процессами диагенетических преобразований.

Региональные особенности развития выделенных комплексов пород показаны на рис. 2.4.1—2.4.3. Нетрудно видеть, что наиболее древняя часть четвертичного покрова — ледниковый комплекс последнего лужского оледенения — наиболее распространён на востоке и северо-востоке Нарвского залива, что свидетельствует о преобладании здесь эрозионных процессов. Отложения ледникововодного комплекса, занимая большие площади, как бы сдвинуты на запад и юго-запад, генерально обрамляя ледниковые отложения на востоке. Голоценовые морские отложения сдвинуты на северозапад и юго-восток, контролируя наиболее глубокие участки дна современного Нарвского залива.



Рис. 2.4.1. Схема распространения ледникового комплекса отложений g III<sub>vd3</sub><sup>lz</sup> [7]

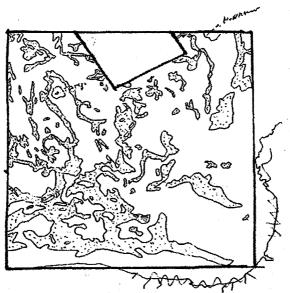


Рис. 2.4.2. Схема распространения ледниково-водного комплекса отложений (балтийские слои)  $\operatorname{IgIII}^B[7]$ .

Можно говорить, что эти три схемы (рис. 2.4.1-2.4.3.) характеризуют начальные условия на момент  $t_{02}$ , т.е условия, которые мы принимаем как квазиравновесные. За каждым из этих трёх комплексов стоят определённые инженерно-геологические условия занимаемых ими территорий и далее мы будем обсуждать причины этой квазиустойчивости, их связь с силовыми полями, создаваемыми в придонных слоях тем или иным режимом — условиями на границах Нарвского залива.



Рис. 2.4.3. Схема распростанения голоценовых морских и озёрных отложений [7]



площадь развития отложений I литолого-структурного комплекса (морские литориновые и постлиториновые отложения m  $IV^{L+pL}$ ) площади развития отложений II литолого-структурного комплекса (озёрные послеледниковые анциловые отложения,  $1\,IV^A$ )

В заключение этого раздела приведём фрагменты геодинамического районирования. В работе [7] дана весьма подробная геодинамическая схема. Мы же ограничимся лишь её основными элементами (см. рис. 2.4.4). Эти элементы довольно чётко показыва-

ют, что инициальные поверхности в целом обрамляют береговую линию, вдаваясь в залив на запад лишь со стороны средней части восточного побережья и прерывисто развиваясь к центру, терминальные поверхности преимущественно сформированы на северозападе и образуют узкую полосу в северо-восточном углу планшета. Между поверхностями этих двух типов расположены общирные переходные области транзита.

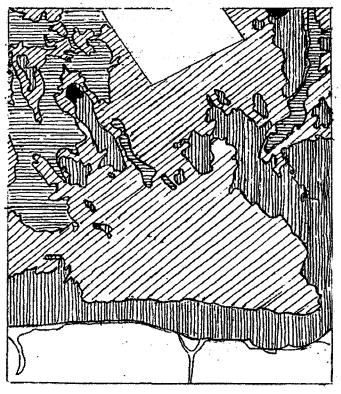


Рис. 2.4.4. Схема элементов геодинамического районирования (из схемы геодинамического районирования [7]).

поверхности размыва (инициальные)

поверхности транзитные (склоновые)

поверхности терминальные (области накопления материала)

Вот основные черты литологической, инженерно-геологической и геодинамической ситуации сложившейся к настоящему времени, принятому нами за  $t_{02}$ .

#### Основные итоги по разделу I

- Создана концептуальная модель формирования литодинамической и инженерно-геологической обстановки для мелководных акваторий (на примере материалов по Нарвскому заливу).
  - Выбраны наиболее характерные ветровые режимы.
  - Построены карты придонных ветровых течений.
- Исходная картографическая информация переведена на числовые шкалы.
- Разработаны методики согласования гидродинамических карт с батиметрической, литологической и инженерно-геологической картами.

Раздел II РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТОДИНАМИЧЕСКОЙ И ИНЖЕРЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДНО АКВАТОРИИ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

#### Глава 3 Методика решения задачи и информация для неё

#### 3.1. Построение полей природных течений

Для построения полей природных течений в заливе была использована программа, созданная П. В. Федоровым. В её основу были положены теоретические работы по динамике водной среды и наносов, а так же утвержденные методики расчетов гидродинамических параметров водной среды (СНиП 2.06.04-82) и собственные разработки её автора.

С исходной батиметрической карты масштаба 1:200.000 снимались значения глубин по сетке 3х3 км (табл. 3.1.1).

На основе этой свёрнутой информации была построена новая батиметрическая карта масштаба 1:500.000 с помощью ПК (рис 3.1.1).

Программа для расчёта придонных течений сделана для автоматического режима счёта и возможности задания параметров волнения на границах. На печать выдаются следующие матрицы:

- 1. Высота и направление распространения разгона волны в узлах сетки. В нашей работе эти материалы не приводятся как не имеющие прямого отношения к задаче.
- 2. Скорость колебательной составляющей волнового течения на заданном горизонте (у нас на дне) в узлах сеточной области. Здесь эта информация не фиксируется, а лишь используется при тренд-анализе гидродинамических полей природного слоя.

Скорость и направление суммарного ветро-волнового течения на заданном горизонте (у нас на дне) в узлах сетки (см. рис. 3.1.2; 3.1.3.; 3.1.4).

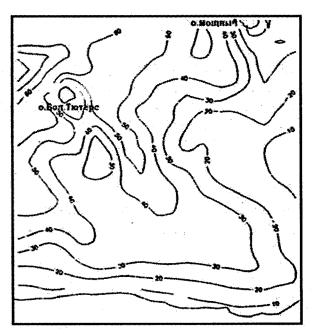


Рис. 3.1.1. Батиметрическая карта дна Нарвского залива, построенная по данным табл. 3.1.1

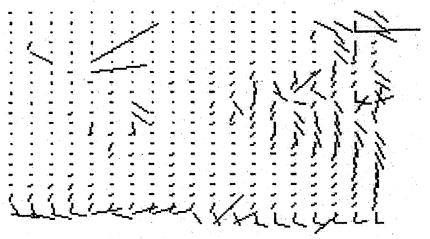


Рис. 3.1.2. Векторы придонных течений при ветре  $\alpha=225^\circ$ ; W=20 м/с. Масштаб: по оси абсцисс 1:400.000; по оси ординат 1:730.000. 1 мм вектора равен скорости 1 см/с (на рис.3.1.3 и 3.1.4 – тоже)

Юго-западный ветер максимальной силы (рис. 3.1.2) создает довольно интенсивные природные течения в мелководной части залива, по-видимому, до изобаты 30 м. На больших глубинах течения существенно меньше и их векторы формируют небольшие волнообразные эпюры, в целом ориентированные на запад. Резкие аномалии на этих эпюрах создает о. Б. Тютерс и 30-метровая банка к юго-востоку от него.

Вдоль южного берега формируются сильные вдольбереговые течения в основном восточного направления, но от глубины 10—15 м начинают появляться течения юго-западной-южной ориентации. Глубже, в соответствии с правилом Экмана, течения развернуты на запад. У восточного берега поле придонных течений наиболее сложное, что связано с изрезанностью рельефа в мелководной зоне этой части планшета. Для неё характерно появление течений юга-восточного направления.

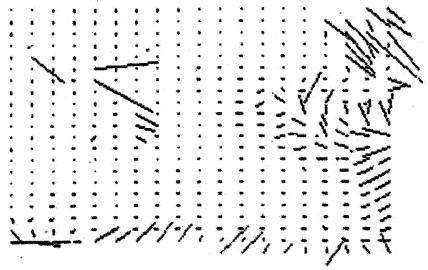
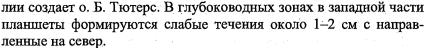


Рис. 3.1.3. Векторы придонных течений при ветре  $\alpha = 270^{\circ}$ ; W = 15 м/с. Масштаб: по оси абсцисс 1:400000; по оси ординат 1:730000.

Сильный западный ветер формирует поле придонных течений более упорядоченной структуры (рис. 3.1.3.). По-прежнему наиболее сильные течения возникают на прибрежных и мелководных участках, контролируемых контуром изобаты 30 м. Резкие анома-



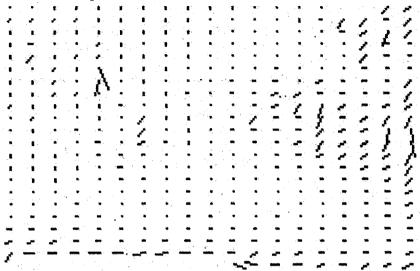


Рис. 3.1.4. Векторы придонных течений при ветре  $\alpha=315^\circ; W=6,75$  м/с. Масштаб: по оси абсцисс 1:400000; по оси ординат 1:730000.

К востоку и к южному берегу придонные течения в глубоких частях залива постепенно переориентируются на запад и создают по профилям слабоволнистые эпюры. У южного берега гначале формируются довольно сильные течения восточного, затем северовосточного направления, а в юго-восточном углу планшета они деформируются в течения северо-западного направления. У восточного берега в нижней части планшеты довольно сильные западные течения переходят в сильные юго-западные. Но к северу это направление постепенно меняется в начале на западное, потом северо-западное и, наконец, северо-восточное. Но такая завернутая структура связана лишь с мелководным выступом в средней части восточной береговой зоны. В самом северо-восточном углу планшета придонные течения большой силы ориентированы уже в направление к берегу — на юго-восток.

Средний северо-западный ветер формирует поле придонных течений небольшой силы в основном южного и западного направлений (рис. 3.1.4). Южное направление преобладает в северной части планшеты, западные — в южной. Остров Б. Тютерс и 30-метровая банка к юго-востоку от него по-прежнему создают аномальную ситуацию, но эти аномалии уже весьма слабы. У южного берега продуцируются течения устойчивой западной ориентации с мелкими юго-западными и юго-восточными отклонениями. В центральной части восточного берега в направлении к западу по-прежнему наблюдается усложненная ситуация. Но циркуляционные структуры придонных течений уже не просматриваются. В основным существуют не сильные течения юго-западной ориентации. Такие же течения формируются и в северо-восточном углу планеты, к востоку от о. Мощный.

Описанные придонные гидродинамические поля схематизировано изображены на рис. 3.1.5.

Эти схемы наглядно показывают следующее:

- 1. В относительно глубоководных зонах Нарвского залива (больше изобаты 30м) создается некое фоновое гидродинамическое поле, хорошо описываемое слабоволнистыми эпюрами. При ветрах  $\alpha=225^\circ$ ,  $\alpha=270^\circ$  фоновое поле имеет в основном западную ориентацию и определяет перенос данного материала скорей всего тонкой взвеси и мелкой фракции (от 0,05 до 0,5 мм) . При северозападных ветрах ( $\alpha=315^\circ$ ) фоновое поле разделяется на 2 зоны: северную с течениями южного направления и южную с течениями западной ориентации. Абсолютные значения скоростей для этого фона также не велики 0,5–3 см/с.
- 2. На участках относительных мелководий (до 30 м) у островов и в прибрежной зоне формируются довольно сильные придонные течения. При юго-западном ветре ( $\alpha = 225^{\circ}$ ) они носят мелкоциркуляционный характер при общем развороте в сторону юго-восточного угла. При западных ветрах ( $\alpha = 270^{\circ}$ ) в мелководных зонах придонные течения более выдержаны по направлению и имеют общий разворот от юго-восточного угла. Северо-западные ветры ( $\alpha = 315^{\circ}$ ) на мелководьях создают придонные течения меньшей силы, но с устойчивой ориентацией на запад.

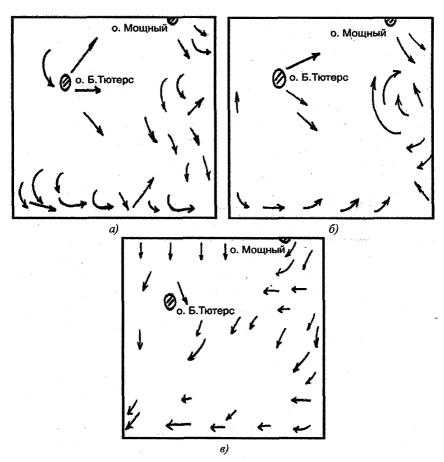


Рис. 3.1.5. Обобщающие схемы суммарных ветровых течений в придонном слое а) на общем фоне слабых течений западного направления ( $\alpha=225^\circ;W=20\text{ м/c};L=65\text{ км}$ ) б) на общем фоне слабых течений западного направления ( $\alpha=270^\circ;W=15\text{ м/c};L=450\text{ км}$ ) в) на общем фоне слабых течений южного (на севере) и западного (на юге) направлений ( $\alpha=315^\circ;W=6,75\text{ м/c};L=125\text{ км}$ )

## 3.2. Формализация литологической и инженерно-геологической карт

При переводе литологической и инженерно-геологической информации в иерархическую шкалу на соответствующих картах масштабов 1: 200.000 были построены сетки с размером ячеек 2×2 км (1×1см) (см. главу 1, п. 1.5). Для центров этих ячеек опре-

делялось число из пронумерованной легенды. Однако эту на вид простую процедуру оказалось невозможным всегда однозначно формализовать, поскольку даже в такую небольшую ячейку часто попадали разные отложения, иногда три и больше типов (из условных обозначений). В связи с этим ячейки заполнялись цифрами по следующему правилу:

- 1. Если в ячейку попадали отложения, обозначенные в легенде одним числом, то именно это число и приписывалось центральной точке этой ячейки.
- 2. Если в ячейку попадали два, три или более типов отложений, обозначенных в легенде, разными числами, центру ячейки приписывалось то число, которое относилось к отложениям, занимающим в ячейке большую площадь. Однако для такой ситуации предусматривалось исключение. Оно состояло в том, что отложения какого-то типа, занимающие не максимальную площадь, могли представить собой на карте небольшое пятно, отраженное либо этой одной ячейкой, либо часть этого пятна переходила в другие ячейки, но там на долю этих отложений тоже приходилась меньщая площадь. Чтобы не потерять факт присутствия этого типа отложений, его номер обязательно ставился либо в ячейке, где они появились впервые, либо в любой соседской ячейке по усмотрению оператора. Главная цель, которая при этом преследовалась, заключается в том, чтобы факт присутствия этих отложений был зафиксирован. Поскольку при заполнении ячеек цифрами мы переходили на более мелкий масштаб (с 1:200.000 к 1:500.000), а исходная карта рисовалась вручную, то мы были уверены, что при таком свертывании начальной информации принципиального ущерба ей не наносилось.

Цифровая информация по литологической и инженерногеологической картам, полученная таким способом приведена в табл. 3.2.1 и 3.2.2.

На основании этих таблиц были построены соответственно карты литологическая и инженерно-геологическая масштабов 1:500.000. В отличие от исходных карт, они изображают литологическую и инженерно-геологическую обстановку в изолиниях (см. рис. 3.2.1; 3.2.2.).

# Матрица литологической информации

	•	*			•		•		•	•	•		,											·	•	•					
	ı	7		12	ı	m	I	က	1	. 12	1	4	1	ო	ı	14	15	14	18	12	6	17	15	7 7	9	18	က	91	.n. (	 	,
	1	0	ı	10	ı	2	ı	<b>'</b>		∞	14	,	18	9	18	7	17	12	17	_	17	17	17	7 1	9	17	33	17	7 ;	17	•
	1	7	1	m	1	<b>∞</b>	L	.œ	13	∞	13	9	17	12	17	10	17	6	17	15	13	0 :	<u>~</u> <u>c</u>	7 5	12	13	7	13	_;	12	١
lu u	Ţ		· · J	٣	1	m	15	15	14	17	17	. 7	Ξ	12	17	18	17	18	13	7	8	7	<u></u>	o. 5	j.∞	m	17	7	7	<u>~</u> 0	Ņ
nwopman	1	00	12	7	~	4	18	9	17	16	17	17	17	17	17	7	15	2	15	7	18	14	17	~ ~	, m	6	∞	_	17	∞ <u>c</u>	7
H HOUSE	17	17	17	17	16	17	12	17	16	17	17	17	14	17	14	17	12	17	Ξ	12	7	7	9	0	£ _	13	7	13	ς,	∞ ۲	•
n lollol n	17	12	17	17	14	- 1	6	17	17	17	15	7	17	7	12	œ	က	12	7	12	12	0	12	o <u>r</u>	<u>,</u> m	18	12	12	_	2 2	71
агрица	12	ξij	Ξ.	- 1	13		13	ı	10	17	18	7	12	17	7	12	ı	9	9	<b>6</b>	12	'n	17	- 1	17	17	. 21	14	17	5 5	77
¥1	14	1	m	· 1	14	1	11	ı	14	٦	14	17	<u>8</u>	12	18	7	12	7	12	7	11	7	17	7 7	17	17	12	14	12	0 6	,
	7	١	7		17	1	7	. 1	13	ľ	17	17	14	ωį	16	12	17	12	17	17	17	12	17	7.5	12.	12	7	16	wj.	16	0
	12	ı	12	1	12	ì	12	ı	9	1	12	ì	ĸ)	17	4	12	. 9	17	14	Ξ	12	12	2 :	21.	· (C)	17	13	7	9	<b>~</b> °	0
	12	ı	18	i i	8	14	.7	I	7	1	7	ľ	m	13	∞	11	12	18	17	16	17	12	17	v <u>r</u>	17	16	7	18	6	ر د ز	71
	12		17		17		∞		7		18		13		17		15	,	9		17		17	5	71	9		14		18	

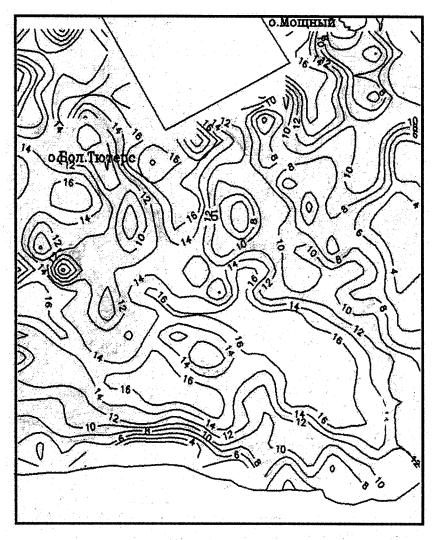


Рис. 3.2.1. Литологическая карта Нарвского залива в изолиниях. Масштаб 1:500.000 глубоководные отложения (1–7); пески (8–14); алвритовые отложения (5–18).



Рис. 3.2.2. Инженерно-геологической карта Нарвского залива в изолиниях. Масштаб 1:500.000

Условные обозначения смотреть в главе 1, п. 1.5 I (1–7) – породы особого состава;

II–III (6–13) – породы малой степени литификации (II, 8–12), группы смешанных пород, рыхлые, несвязные, мягкие (III, 13);

IV-V (14-15) - глинистые породы высокой степени уплотнения(IV, 14), сложный комплекс глинистых пород степени литификации (V, 15).

Построенные карты требуют пояснений и, в первую очередь потому, что, будучи выполненными в изолиниях, они изображают некую континуальную поверхность. Границы между отложениями разных типов на такой карте — линии с последовательно сменяющимися номерами. Например, до линии с номером 14 может быть только линия с номером 13, но после номера 14 должен следовать номер 15. Иными словами, по постановке — это согласованный ряд чисел, хотя в природе такая согласованность является, скорей, исключением, чем правилом, поскольку природная ситуация редко бывает детерминированной, чаще всего она дискретна.

Таким образом, переход к системе изолиний есть не что иное, как акт замены дискретной литологической и инженерно-геологической обстановок (в терминах соответствующих классификации) на континуальные. Это чисто теоретический акт, но он правомерен и в науке используется часто. Достаточно вспомнить классическую теорию фильтрации, когда реальная дискретная трещиннопористая среда горных пород в теории заменяется на сплошную (континуум) с неким гидравлическим сопротивлением и сам подземный поток при этом из струйчатого превращается в сплошной.

В такой подмене кроятся большие преимущества перед дискретной формой изображения геологического устройства дна. Одно из них, может быть самое сильное, заключается в том, что континуальная поверхность математически довольно просто оформляется, например, в виде полинома того или иного порядка или каким-то другим неполиномиальным алгоритмом, со всеми вытекающими отсюда последствиями как в раскрытии сущности объекта исследования, так и в возможностях прогноза.

Рассмотрим рис. 3.2.1. Он хорошо согласуется с генеральным описанием литологического устройства дна Нарвского залива (см. главу 2, п 2.3). У южного и восточного побережья преимущественно развиты грубообломочные отложения. Далее от берега и на большей части дна широко представлены разнообразные пески, переходящие в алевритовые породы. Таким образом, мы видим, что континуальное изображение литологического устройства дна даже в иерархической шкале чётко коррелирует с теоретическими схемами терригенного осадконакоплениям в мелководных бассейнах, основанных на законе Стокса и принципах гидродинамической зональности.

Теперь обратимся к рис. 3.2.2. Из него видно, также к зонам, покрытым отложениями алевритового комплекса, что видно из рис. 3.2.1.

Вот так выглядит та геологическая информация (литологическая и инженерно-геологическая), которая была положена в основу построения литодинамической модели дна Нарвского залива.

#### 3.3. Использование тренд-анализа

В английском языке слово тренд (trend) означает тенденцию, основное направление. Суть тренд-анализа состоит в условном разделении реально наблюдаемой причинно-вероятностной связи между событиями, на систематическую и случайную составляющие. Широкое применение такой подход нашёл при работе с различного рода картографическим материалом. Для этого класса задач существуют разнообразные стандартные программы, среди которых наиболее распространенны полиномиальные решения. В общем виде систематическая (или трендовая) составляющая входит в уравнение следующего вида:

$$z(x, y) = \tau(x, y) + e(x, y),$$
 (3.3.1)

где: z(x, y) — наблюдаемое значение признака в точке с координатами x, y;  $\tau(x, y)$  — систематическая составляющая этого признака в той же точке; e(x, y) — случайная составляющая того же признака в этой же точке (или остаток).

Поскольку такое разделения условно из-за того что делится неделимое, вид функции  $\tau(x, y)$  может быть любым. Всё зависит от того уровня решения, который мы хотим получать. Например, если  $\tau(x, y)$  — это полином, то, в принципе, можно использовать полином любой степени. При её увеличении остаток e(x, y) будет уменьшаться, и в пределе мы можем придти к ситуации, когда

Но такая задача графически нами уже решена на картах в изолиниях, это показано на рис. 3.1.1; 3.2.1; 3.2.2. И понятно, что стремление изобразить и описать детали лишает нас возможности увидеть общие черты разных явлений и потому скрывает существующую между ними глубинную связь.

Предельное упрощение для такой задачи состоит в использовании полинома первой степени. Однако для Нарвского залива такой полином будет неестественным, поскольку мы рассматриваем весь залив, а его контур является криволинейным и напоминает гиперболу. Именно это обстоятельство определило выбор в качестве функции  $\tau(x, y)$  полинома второй степени для всех принятых нами в обращении параметров:

- моделей скоростей природных течений ( $V_p$  для прогрессивной составляющей,  $V_r$  для реверсивной, размывающей составляющей), при выбранных в качестве граничных условий направлениях ( $\alpha$ ) и скоростях ветра (W);
  - батиметрических отметок дна (Z);
  - чисел, характеризующих литологическую обстановку дна,
- чисел, характеризующих инженерно-геологические условия.

Вид полинома второй степени, выбранного в качестве тренда т(х, у), и значения его коэффициентов для всех названных параметров приведены в табл. 3.3.1, а графический вид этих погерхностей и случайных составляющих (остатков) показан на рисунках 3.3.1 - 3.3.5. На первых трех рисунках изображены  $\tau(x, y)$  и e(x, y)для реверсивных (размывающих) скоростей. Нетрудно увидеть, что юго-западные ( $\alpha = 225^{\circ}$ ) и западные ( $\alpha = 270^{\circ}$ ) ветра на уровне рассматриваемых трендов создают по ориентации мало отличимые поля. Это вогнутые эллипсовидные поверхности с ясно выраженной длинной осью в направлении на северо-запад. Однако, несмотря на меньшую скорость западного ветра продуцируемые им природные реверсивные течения обладают не только большей силой, но и создают почти в два раза больше полиномиальные градиенты. Это видно из рис. 3.3.6. Северо-западный ветер ( $\alpha = 315^{\circ}$ ) формирует наиболее пологую полиномиальную поверхность  $(V_r)$ , а длинная ось эллипсоидов этой поверхности (изолиний) повернута почти строго на север. Карты остатков на всех трех рисунках также весьма похожи, по крайне мере, по принципиальному расположению плюсовых и минусовых отклонений. Плюсовые остатки формируют полосу у южного берега, довольно широкую зону северо-западной ориентации в центральной части залива и занимают северо-западный угол планшета.

Таблица 3.3.1 Значение коэффициентов уравнения тренда второй степени для исследуемых характеристик. Общий вид уравнения тренда второй степени:  $Z(x, y) = A_0 + A_1 x + A_2 y + A_4 x^2 + A_5 y^2$ 

	Гидре	одинами	ка потока	уднап	ри ветре	: α, W	Бати-	Лито-	Инж.
Ко-	225 гр.	20 м/с	270 гр.	15 м/с	315 гр.	6,75 м/с	метрия	логия	геоло-
эфф.	$V_r$	Прогр.	$V_r$	Прогр.	$V_r$	Прогр.	7	I.	гия
	разм	$V_p$	разм	$V_p$	разм	$V_p$	1	2	I
$A_0$	74,25	12,324	147,257	12,293	6,703	3,696	-10,511	2,797	14,089
$A_1$	-1,852	-0,267	-3,806	-0,408	-0,287	-0,096	0,724	0,294	-0,172
$A_2$	-2.337	-0,370	-3,977	-0,340	-0,168	-0,095	1,874	0,334	-0,177
$A_3$	0,013	0,002	0,034	0,003	0,000	0,001	-0,018	-0,003	0,003
$A_4$	0,031	0,004	0,060	0,006	0,006	0,002	-0,010	-0,003	0,001
A <sub>5</sub>	0,020	0,003	0,029	0,003	0,002	0,001	-0,010	-0,004	0,001

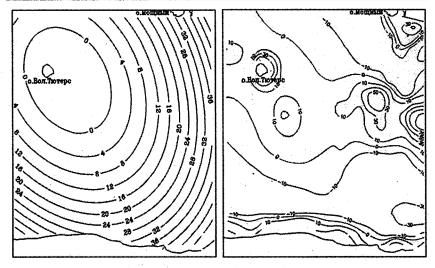


Рис. 3.3.1. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для размывающих составляющих скоростей придонных течений ( $V_r$ ) при ветре  $\alpha = 225^0$ ; W = 20м/с. Масштаб 1:500.000.

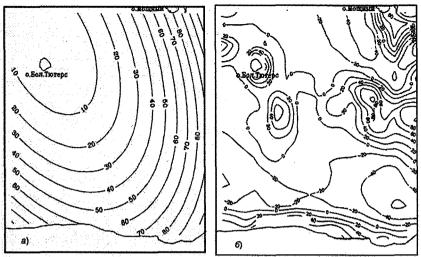


Рис. 3.3.2. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для размывающих составляющих скоростей придонных течений  $(V_r)$  при ветре  $\alpha = 270^{\circ}$ ; W = 15 м/с. Масштаб 1:500.000.

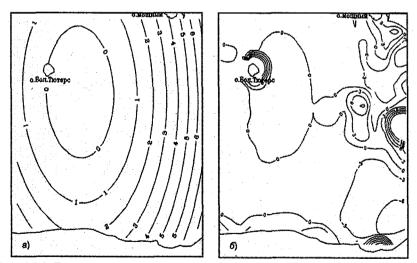


Рис. 3.3.3. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для размывающих составляющих скоростей придонных течений  $(V_r)$  при ветре  $\alpha=315^0;\ W=6,75\text{м/c}.$  Масштаб 1:500.000.

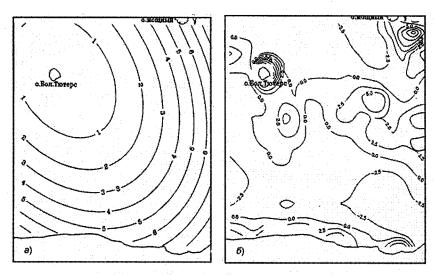


Рис. 3.3.4. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для прогрессивной составляющей скоростей придонных течений  $(V_p)$  при ветре  $\alpha=225^0$ ; W=20м/с. Масштаб 1:500.000.

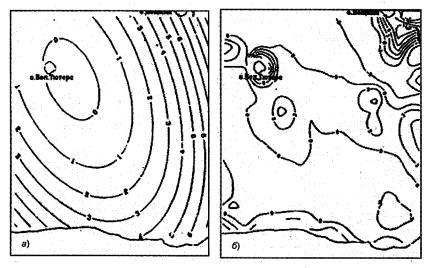


Рис. 3.3.5. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для прогрессивной составляющей скоростей придонных течений ( $V_p$ ) при ветре  $\alpha = 270^{\circ}$ ; W = 15 м/c. Масштаб 1:500.000.

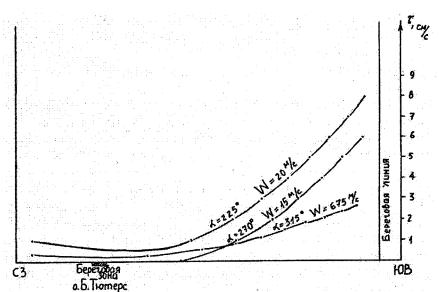


Рис. 3.3.6. Профили трендовых поверхностей полей придонных скоростей реверсивных течений,  $V_p$  (построены по диагонали планшета СЗ-ЮВ).

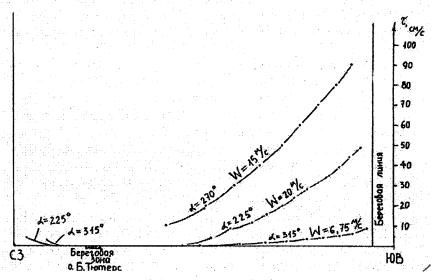


Рис. 3.3.7. Профили трендовых поверхностей полей придонных скоростей прогрессивных течений,  $V_p$  (построены по диагонали планшета C3-ЮВ).

Всё это говорит о том, что любой из рассмотренных ветров, дающий волну в длинном разгоне, в Нарвском заливе формирует однотипные поля реверсивных придонных течений, что скорей всего обусловлено особенностями морфологии дна и очертанием берегов.

Поверхности  $\tau(x,y)$  и e(x,y) для скоростей прогрессивных природных течений также являются продуктом трёх заданных ветровых режимов. Они проиллюстрированы здесь лишь двумя рис. 3.3.4 – 3.3.5. Общие контуры и ориентация трендовых поверхностей, как и для реверсивных течений по-прежнему северозападные с заметным разворотом в сторону северных румбов. Наиболее пологая поверхность  $\tau(x,y)$  снова связано с ветрами  $\alpha=315^\circ$ , что показывает рисунок 3.3.7. Полиномы от юго-западных и западных ветров по уклонам более близки, чем в случае реверсивных течений. Однако, при западном ветре, полином прогрессивного течения более сжат вдоль длинной оси, чем полином при ветре юго-восточном.

Остатки трендов по основной рисовке также близки между собой и в генеральном плане схожи с остатками трендов реверсивных течений. Только при ветре  $\alpha=315^\circ$  средняя плюсовая зона разорвана и её северо-западная часть как бы развернута и опущена к югу.

Таким образом, простой обзор карт с поверхностями  $\tau(x, y)$  и e(x, y) для двух составляющих ветровых природных течений — реверсивной и прогрессивной, показывает, что при любом из рассмотренных ветров формируется некий полиномиальный фон с уменьшением модуля скоростей от берегов к центру залива в направлении на о. Б. Тютерс. Аномально сильные течения (положительные остатки) возникают у южного берега залива, в северовосточном углу планшета и в средней части залива на полосе северо-западного направления.

На рис. 3.3.8 показаны поверхности  $\tau(x, y)$  и e(x, y) для изобат (z). Поверхность тренда имеет параболическую форму и отражает генеральный характер погружения дна залива. Она открыта на север, северо-запад и запад. Аномально низкие глубины связаны с отрицательными остатками, а аномально высокие — с положительными. Нетрудно увидеть, что общие контуры и площади с отрица-

тельными остатками довольно четко согласуются с особенностями развития аномально сильных придонных течений.

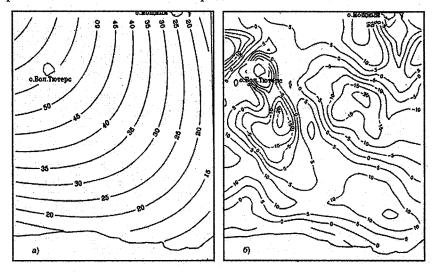


Рис. 3.3.8 Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для изобат (Z, м). Масштаб 1:500.000.

Трендовые же поверхности этих параметров отличаются. В пределах планшета батиметрический тренд представляет собой незамкнутую поверхность в отличие от замкнутых трендовых поверхностей придонных течений.

Тренд литологических характеристик (по L) (см. рис. 3.3.9) представляет собой выпуклую поверхность, очерчиваемую системой эллиптических изолиний. Как и на трендах течений, длинная ось этих эллипсов направлена на северо-запад.

Поскольку тренд мы рассматриваем как некий переменный фон, то к цифрам, обозначающим изолинии трендовой поверхности, следует относиться как к фоновым признакам. На большей части планшета находятся цифры от 10 до 13, что соответствует развитию отложений от глинистых песков до песков мелкозернистых. И только в северо-восточном и юго-западном углах планшета в качестве фоновых литологических разностей появляются пески среднезернистые (№ 9) и крупнозернистых (№ 8).

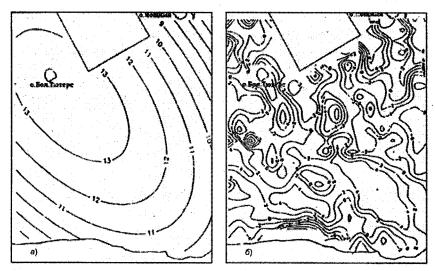


Рис. 3.3.9. Трендовая поверхность второго порядка (а) и поверхность остатка (б) для литологических характеристик (L)

(см. главу 2 п. 2.3 – Литологическая обстановка). Масштаб 1:500.000.

Отрицательные остатки говорят об аномальных отклонениях в сторону увеличения крупности осадков, положительные остатки — это отклонения в сторону уменьшения крупности. Площади с отрицательными аномалиями визуально коррелируют с зонами аномально уменьшенных глубин и аномально повышенных скоростей реверсивных и прогрессивных течений.

Трендовая поверхность инженерно-геологических параметров, рис. 3.3.10, не похожа ни на одну из рассмотренных ранее. Она напоминает седловину с осью прогиба вытянутой на северозапад и как фон характеризуется числами в основном 9 и 10, что отражает развитие пород малой степени литификации и, в частности, озёрно-ледниковые балтийские глинистые осадки. Получается, что водно-ледниковый комплекс осадков 1g III<sup>B</sup> (балтийские слои), схема распространения которого показана на рис. 2.4.2 (см. главу 2, п. 2.4), выступает в качестве фоновых отложений, как некая форма, от которой оцениваются отклонения.

Площадь с отрицательными отклонениями (остатками) свидетельствуют о развитии на них тенденций в сторону ухудшения инженерно-геологических качеств грунтов, а площади с положительными отклонениями – в сторону улучшения.

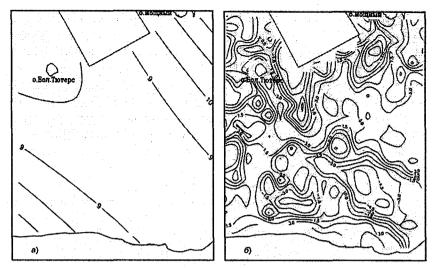


Рис. 3.3.10. Трендовая поверхность второго порядка а) и поверхность остатка б) для инженерно-геологических характеристик (*I*) (см. главу 2, п. 2.4 – инженерно-геологические условия). Масштаб 1:500.000.

Важно заметить, что как и поверхность тренда; поверхность остатка визуально не похожа на ранее рассмотренные аномальные поверхности (ни по z, ни по  $V_r$ , ни по  $V_p$ , ни по L).

#### 3.4. Способы поисков связей между информационными структурами гидродинамических и геологических полей

Следуя постановке задачи (см. главу 1), для её решения мы получили набор числовых карт в масштабе 1:500.000. Таким способом мы не только добились перевода различных форм начальной информации в одну форму, но и представили её на одном структурном уровне, разделив на систематические и случайные составляющие. При этом систематику сделали также однотипной в виде полиномов второй степени. В результате появилась возможность достаточно корректно проанализировать пространственные связи между гидродинамическими, морфологическими, литологическими и инженерно-геологическими полями в пределах Нарвского залива.

Очевидно, что сравнение полиномов одной степени, так или иначе, сведётся к сравнению их коэффициентов. Например, если коэффициенты у всех сравниваемых полиномов окажутся, соответ-

ственно, одинаковыми, то можно говорить, что описываемые ими поверхности тоже одинаковые и что в этом случае они просто сольются в одну поверхность. Если, скажем, между всеми соответствующими коэффициентами существуют одинаковые отношения, выражаемые каким-то числом для каждой пары полиномов, то описываемые такими полиномами поверхности параллельны. Они могут быть совмещены последовательным делением каждого полинома на это число. Сказанное можно записать следующим образом:

- 1. Полиномы второй степени имеют коэффициенты A0, A1, A2, A3, A4, A5.
  - 2. Число таких полиномов m = I, II, III ...
- 3. Сравниваемые коэффициенты представляют собой ряды чисел:
  - (A0)I, (A1)I, (A2)I, (A3)I, (A4)I, (A5)I;
  - (A0)II, (A1)II, (A2)II, (A3)II, (A4)II, (A5)II;
  - (A0)III, (A1)III, (A2)III, (A3)III, (A4)III, (A5)III ит.д.
  - 4. Речь идет об условии:
- (A0)I/(A0)II = (A1)I/(A1)II = (A2)I/(A2)II = (A3)I/(A3)II = (A4)I/(A4)II = (A5)I/(A5)II = const (I, II)
- (A0)I / (A0)III = (A1)I / (A1)III = (A2)I / (A2)II = (A2)I / (A2)III = (A3)I / (A3)III = (A4)I / (A4)III = (A5)I / (A5)III = const (I, III) и т.п.

Если const  $(I, II) = \text{const } (I, III) = \dots = 1$ , то полиномы равны, т.е. поверхности, описываемые ими, сливаются.

Если const (I, II)  $\neq$  const (I, III)  $\neq$  .....  $\neq$  1, то полиномы описывают параллельные поверхности и деление коэффициентов (A0)II, (A1)II, (A2)II, (A3)II, (A4)II, (A5)II на число const (I, II) приведет к условию (A0)I = (A0)II, (A1)I = (A1)II и т.д. То же получим при делении (A0)III, (A1)III и остальных членов этого ряда на число const (I, III) и т.д.

В нашем случае такой способ сравнения полиномов не только удобен, но, главное безопасен с точки зрения корректности процедуры, поскольку сами полиномы построены для разных параметров в разных шкалах (отношений, интервальной иерархической, см. главу 1).

Ряды чисел A0, A1, A2, A3, A4, A5 для разных полиномов можно сравнить и с помощью метода знаковой корреляции [1].

Суть его сводиться к тому, что между двумя соседними числами каждого такого ряда устанавливается факт положительного или

отрицательного приращения. Сравниваются знаки таких приращений у двух рядов. Случаи, когда приращение равно нулю не принимается во внимание. Обозначив количество совпадений знака приращений через  $m_1$ , а количество не совпадений через  $m_2$ , получают некое число N модуль которого |N| показывает силу связи рассматриваемых рядов (или сигналов) и характеризует вероятность p = |N| того, что при отсутствии помех два сравниваемых сигнала совпадают во всяком случае с точностью до знака приращения:

$$P = |N| = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} = 1.$$

Таблица 3.4.1 Общий вид матрицы знаковой связи (в p = |N|)

		$V_r^{225}$	$V_p^{225}$	$V_r^{270}$	$V_{p}^{270}$	$V_r^{315}$	$V_{p}^{315}$	Z	L	I
<u> </u>		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_r^{225}$	1	1	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	$P_{17}$	$P_{18}$	$P_{19}$
$V_p^{225}$	2		1	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{25}$	$P_{26}$	$P_{27}$	$P_{28}$	$P_{29}$
$V_r^{270}$	3			1	$P_{34}$	$P_{35}$	$P_{36}$	$P_{37}$	$P_{38}$	$P_{39}$
$V_p^{270}$	4				1	P <sub>45</sub>	$P_{46}$	P <sub>47</sub>	$P_{48}$	$P_{49}$
$V_r^{315}$	5					1	$P_{56}$	$P_{57}$	$P_{58}$	$P_{59}$
$V_p^{315}$	6						1	P <sub>67</sub>	$P_{68}$	P <sub>69</sub>
Z	7							1	$P_{78}$	$P_{79}$
L	8								1	$P_{89}$
I	9				4					1

При сравнении нескольких рядов  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$  (символов), в нашем случае 9 полиномов, результаты их погарного сравнения могут быть оформлены в виде матрицы связей или в виде графа. Следуя принятым обозначениям, каждый ряд коэффициентов  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ .... обозначим соответственно  $V_r^{225}$ ,  $V_p^{270}$ ,  $V_p^{270}$ ,  $V_r^{315}$ ,  $V_p^{315}$ , Z, L, I. (Числа справа наверху индексируют те ветровые условия (по углу), которые формируют поле соответствующих скоростей) Тогда матрица знаковой связи будет выглядеть, как показано в табл. 3.4.1. На основе элементов этой матрицы могут быть построены отдельные графы, входящие как структурные ячейки в блок-схему формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе (см. главу 1, рис. 1.2.2).

Связь между остатками (случайными составляющими) оценивалась на основе коэффициентов обычной парной корреляции по стандартным программам.

Результаты всей этой работы приводятся в следующей главе.

# Глава 4 Связь морфологических, литологических и инженерно-геологических условий со структурами ветровых придонных течений

#### 4.1. Уровень связи полиномов второго порядка

Следуя методике сравнения полиномов, предложенной в главе 3, мы составили ряд таблиц, в которых в каждой строке дано отношение коэффициентов  $A_0$ : $A_0$ ;  $A_1$ : $A_1$  и т. д., для различных видов отношений: коэффициентов первого уравнения (I) к коэффициентам уравнений II, III, IV, .... IX и т. д. (см. табл. 4.1.2. - 4.1.8).

Как и следовало ожидать, в силу того, что точного совпадения соответствующих коэффициентов в рассматриваемых уравнениях не наблюдалось, не было получено и их отношений, точно равных единице. Например, в табл. 4.1.2. отношение  $A_0$ :  $A_0$  (IV) мы записали равным единице (обозначаем его  $\Delta=1$ ), округлив фактическое отношение  $\Delta=1$ , 00252, полученное из  $A_0$  (II) = 12,324 и  $A_0$  (IV) = 12,293 (см. табл. 3.3.1.).

В большинстве случаев величины отношений существенно от единицы отличные. Однако нас интересует другой вопрос: насколько значение величины  $\Delta$  в каждой строке близки между собой? Поэтому рассмотрим полученные в табл. 4.1.1.-4.1.8 результаты более внимательно.

Таблица 4.1.1 Отношения коэффициентов полиномов  $\tau(x, y)$ , гидродинамических  $(V_n, V_p)$ , морфологических (z), литологических (L) и инженерно-геологических характеристик (I) (по табл. 3.3.1). Вид отношения I:I; I:II; I:III;...1:IX.

	· v .			Коэфф	ициент			Вид
NºNº	Уравнения	A <sub>0</sub>	$\mathbf{A}_{\mathbf{i}}$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	$A_5$	-эшонто кин
I	$V_r^{225}$	1	1	1	1	1	1	I:I
II	$V_p^{225}$	6,02	6,94	6,32	6,5	7,75	6,67	I:II
III.	$V_r^{270}$	0,50	0,49	0,59	0,38	0,52	0,69	I:III
IV	$V_{p}^{270}$	6,04	4,54	6,87	4,33	5,17	6,67	I:IV
V	$V_r^{315}$	11,07	6,45	13,91	œ	5,17	10,0	I:V
VI	$V_p^{315}$	20,08	19,29	24,6	13,0	15,5	20,0	I:VI
VII	Z	-7,06	-2,56	-1,25	0,72	-3,1	-2,0	I:VII
VIII	L	26,53	-6,3	-7,0	-4,33	-10,33	-5,0	I:VIII
IX	I	5,27	10,77	13,2	4,33	31,0	20,0	I:IX

Отношение полиномов τ(x, y). Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения Π:II; Π:III; .... П:IX

NoNo	Уравнения	Коэффициент										
745745		$A_0$	$A_1$	$A_2$	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	$A_5$					
II	$V_p^{225}$	1	1	1	1	1	1					
III	$V_r^{270}$	0,08	0,07	0,09	0,06	0,07	0,10					
IV	$V_{p}^{270}$	1,00	0,65	1,09	0,67	0,67	1,00					
V	$V_r^{315}$	1,84	0,93	2,20	∞	0,67	1,5					
VI	$V_p^{315}$	3,33	2,78	3,89	2,0	2,0	3,0					
VII	Z	-1,17	-0,37	-0,20	-0,11	-0,4	-0,3					
VIII	L	4,41	-0,91	-1,11	-0,67	-1,33	-0,75					
IX	I	0,87	1,55	2,09	0,67	4,0	3,0					

 $Tаблица\ 4.1.3$  Отношение коэффициентов  $\tau(x,y)$ . Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения III:III; III:IV;... III: X

NoNo	Уравнения		Коэффициент										
745745		$A_0$	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	$A_4$	$A_5$						
III	$V_r^{270}$	1	1	1	1	1	1						
IV	$V_p^{270}$	11,98	9,32	11,69	11,33	10,0	9,67						
V	$V_r^{315}$	21,97	13,26	23,97	∞	10,0	14,5						
VI	$V_p^{315}$	33,84	39,64	41,87	34,0	30,0	29,0						
VII	Z	-14,0	-5,26	-2,12	-1,89	-6,0	-2,9						
VIII	L	52,64	-12,94	-11,91	-11,33	-20,0	-7,25						
IX	I	10,45	+22,13	22,47	11,33	60,0	29,0						

 $Tаблица\ 4.1.4$  Отношение коэффициентов  $\tau(x,y)$ . Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения IV: IV; IV: V;...IV:IX

					. , – ,		
NoNo	Уравнения			Коэфф	ициент		
הורהור		$A_0$	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
IV	$V_{p}^{270}$	1	1	1	1	1	1
V	$V_r^{315}$	1,83	1,42	2,02	00	1,0	1,5
VI	$V_p^{315}$	3,33	4,25	3,58	3,0	3,0	3,0
VII	Z	-1,17	-0,56	-0,18	-0,17	-0,6	-0,3
VIII	L	4,40	-1,39	-1,02	-1,0	-2,0	-0,75
IX	I	0,87	+2,37	1,92	1,0	6,0	3,0

### Отношение коэффициентов полиномов τ(x, y). Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения V:V; V:VI;.... V:IX

NºNº	<b>У</b> равнения		Коэффициент										
145145	у равцения	A <sub>0</sub>	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>						
V	$V_r^{315}$	1	1	1	1	1	1						
VI	$V_p^{315}$	1,81	3,00	1,77	0	3,0	2,0						
VII	Z	-0,64	-0,4	-0,09	0	-0,6	-0,2						
VIII	L .	2,4	-0,98	-0,50	0	-0,2	-0,5						
IX	I	0,48	1,67	0,95	0	6,0	2,0						

 $Tаблица\ 4.1.6$  Отношение коэффициентов полиномов  $\tau(x,y)$ . Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения VI:VI; VI:VII; VI:VII; VI:IX

NoNo	Уравнения	Коэффициент										
145145	у равнения	A <sub>0</sub>	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>					
VI	$V_{p}^{315}$	1	1	1	1	1	1					
VII	Z	-0,35	-0,13	-0,05	-0,06	-0,2	-0,1					
VIII	L	1,32	-0,33	-0,28	-0,33	-0,7	-0,25					
IX	I	0,26	0,56	0,54	0,33	2,0	1,0					

Tаблица 4.1.7 Отношение коэффициентов полиномов  $\tau(x,y)$ . Вариант табл. 4.1.1. Вид отношений VII:VII; VIII:VIII; VIII:IX.

NoNo	Уравнения		Коэффициент									
145145	у равнения	A <sub>0</sub>	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	$A_5$					
VII	Z	1	1	1 -	1	1	1					
VIII	L	-3,76	2,46	5,61	6,0	3,3	2,5					
IX	. Fig. $I$ .	-0,75	<b>-4,2</b>	-10,59	-6,0	-10,0	-10,0					

 $Tаблица\ 4.1.8$  Отношение коэффициентов полиномов  $\tau(x,y)$ . Вариант табл. 4.1.1. Вид отношения VIII: VIII; VIII: IX

NoNo	Vacarrarrar	Коэффициент									
145145	Уравнения	$A_0$	$A_1$	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub> .	$A_5$				
VIII	L	1	1	1	1	1	1				
IX	I	0,20	-1,71	-1,88	-1,0	-3,0	-4				

Для каждой строки этих таблиц вычислено среднее значение  $\Delta_{\rm cp}$  и среднеквадратичная погрешность  $S_n$ , являющаяся для малых выборок аналогом стандартного отклонения  $\sigma$ . Напомним, это при большом числе измерений (больших n)  $\sigma \approx S_n$ . Для расчётов использовались стандартная программа, в которой дисперсия выборки  $D(\Delta x)$  вычисляется по формуле:

$$D(\Delta x) = S_n^2 = n/(n-1)\{1/n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - x_{cp}^2\},$$
 (4.1.1)

а среднеквадратичная погрешность соответственно

$$S_n = \left[ (n/(n-1)) \left\{ 1/n \sum_{i} x_i^2 - x_{cp}^2 \right\} \right]^{1/2}$$
 (4.1.2)

Для того чтобы среднеквадратичную оппибку для всех строк и таблиц сделать сравнимой, проведём её нормировку на  $|\Delta_{\rm cp}|$  по каждой строке, получив, таким образом, анализ коэффициента вариации  $C_{\rm v}$ . Обозначим этот аналог через  $C_{\rm s}$ . Известно, что при большом n  $C_{\rm v} \approx C_{\rm s}$ .

## Анализ таблицы 4.1.1 Таблица 4.1.9 Статистики отношений коэффициентов у полиномов т(х, у) при виде отношений I:II; I:III;...I:IX.

№№	Vnanyayya		Статистики	
115715	Уравнения	$\Delta_{ m cp}$	$S_n$	$C_s$
II	$V_p^{225}$	6,7	0,6	0,09
III	$V_r^{270}$	0,53	0,1	0,19
IV	$V_{p}^{270}$	5,6	1,08	0,19
V	$V_r^{315}$	, <u> </u>	_	- x
VI	$V_p^{315}$	18,7	4,04	0,22
VII	Z	-2,78	2,26	0,81
VIII	L	-1,07	13,68	12,78
IX	I	14,09	10,05	0,71

x – в этой строке есть  $\Delta = \infty$  (по  $A_3$ ).

По величине  $C_s$  можно достаточно уверенно судить о том, насколько полиномиальные поверхности II, III, IV,...IX похожи на полиномиальную поверхность I. Ближе всего к ней поверхность поля прогрессивных скоростей. Относительное отличие их составляет всего 9% ( $C_9 = 0.09$ ). Это естественно, так как поля  $V_r^{225}$  и  $V_p^{225}$  являются продуктом одного и того же ветра. Поэтому данный факт не представляет для нас особого интереса. Достаточно близки к тренду поля  $V_r^{225}$  тренды и других придонных скоростей:  $V_{r,p}^{270}$ ,  $V_p^{315}$ .

Для  $\tau(x, y)$   $V_r^{315}$  таких оценок формально сделать было нельзя в связи с тем, что в строке отношений по коэффициенту  $A_3$  оказалось  $\infty$ . Однако неформальная ситуация заключается в том, что в исходной табл. 3.3.1. величины всех коэффициентов рассчитываются только до третьего знака и  $A_3(V_r^{315}) = 0.000$ . Предложив, что в четвертом знаке уже нет нуля, а какое-то число меньше 5, на-

пример, 3, получим  $\Delta(A_3) = 43,3$  (вместо  $\infty$ ). В этом случае по данным табл. 4.1.1., подставив в строку V вместо ( $\infty$ ) число 43,3, вычислим

$$\Delta_{cp} = 14,98$$
;  $S_n = 14,22$ ;  $C_s = 0,95$ .

Ошибка в 95% уже очень велика. Естественно, что при уменьшении значения коэффициента  $A_3$  ( $V_r^{315}$ ) она будет возрастать.

Отметим это обстоятельство по следующим причинам:

- 1. Это единственное поле скоростей  $\tau(x, y)$ , которое практически совсем не совпадает с  $\tau(x, y)$  поля  $V_r^{225}$ .
- 2. Так же плохо согласуются с  $\tau(x, y)$  поля  $V_r^{225}$  и  $\tau(x, y)$  полей Z, I.
- 3. Совсем не согласуются трендовые поверхности полей  $V_r^{225}$  и L.

#### Анализ таблицы 4.1.2

Таблица 4.1.10 Статистики отношений коэффициентов у полиномов τ(x, y) при виде отношений П:III; П:IV;... П:IX.

NºNº	Уравнения	Статистики			
		$\Delta_{ m cp}$	$S_n$	$C_s$	
III	$V_r^{270}$	0,08	0,01	0,12	
IV	$V_{p}^{270}$	0,85	0,20	0,24	
V	$V_r^{315}$	_	· _	- x	
VI	$V_{p}^{315}$	2,83	0,75	0,26	
VII	Z	-0,42	0,38	0,88	
VIII	L	0,06	2,20	36,72	
IX	I	2,03	1,28	0,63	

 $x - \mathbf{B}$  этой строке есть  $\Delta = \infty$  (по  $A_3$ ).

Используя принятое ранее значение  $A_3$  ( $V_r^{315}$ ) = 0,0003, вместо  $\infty$  в строке V получим при  $A_3$  ( $V_p^{225}$ ) = 0,002 (см. табл. 3.31)  $\Delta$ = 6,67. Тогда вместо прочерков в табл. 4.1.10 будем иметь:

$$\Delta_{cp} = 2,30$$
;  $S_n = 2,21$ ;  $C_s = 0.96$ .

По-видимому, можно констатировать, что при переходе на новый вид отношений коэффициентов принципиально ситуация не изменилась. По-прежнему наиболее аномально выглядит поле литологических параметров (L), несколько ухудшилось согласован-

ность с полем батиметрии (Z), но зато немного улучшилась согласованность с полем инженерно-геологических характеристик (I).

#### Анализ таблицы 4.1.3

Tаблица 4.1.1.1 Статистика отношений коэффициентов у полиномов  $\tau(x,y)$  при виде отношений III:IV; III:V;.... III:IX.

NoNo	<b>Уравнения</b>	Статистики			
		$\Delta_{ m cp}$	Sn	Cs	
IV	$V_{p}^{270}$	10,66	1,14	0,11	
V	$V_r^{315}$	_	_	- x	
VI	$V_p^{315}$	34,72	5,13	0,14	
VII	Z	-5,36	4,55	0,85	
VIII	L	-1,80	27,0	14,99	
IX	I	25,90	18,16	0,70	

x – в этой строке есть  $\Delta = \infty$  ( по A<sub>3</sub>).

Взяв снова  $A_3(V_r^{315})=0,003$  для строки V при  $A_3(V_r^{270})=0,034$  получим  $\Delta=113,3$  и далее:

$$\Delta_{\rm cp} = 32,78$$
;  $S_n = 39,79$ ;  $C_s = 1,21$ .

Нетрудно видеть, что принципиальных изменений в наших статистиках опять не произошло. Несколько улучшилась ситуация с полем литологических характеристик, но это лишь относительное улучшение в сравнении с табл. 4.1.10 и только.

#### Анализ таблицы 4.1.4

Таблица 4.1.12 Статистики отношений коэффициентов у полиномов t (x, y) при виде отношений IV: V; IV: VI;.... IV: IX.

NoNo	Уравнения -	Статистики		
		$\Delta_{ m cp}$	$S_n$	$C_s$
V	$V_r^{315}$	<del>-</del>		- x
VI	$V_{p}^{315}$	3,36	0,50	0,15
VII	Z	- 0,50	0,38	0,76
VIII	L	- 0,29	2,34	8,07
IX	I	2,53	1,88	0,74

x-в этой строке есть  $\Delta=\infty$  (A<sub>3</sub>).

При  $A_3$  ( $V_r^{315}$ ) = 0,003 и  $A_3$  ( $V_p^{270}$ ) = 0,003 получим  $\Delta$  = 10,0 (вместо  $\infty$ ) и далее:

$$\Delta_{cp} = 2,96$$
;  $S_n = 3,47$ ;  $C_s = 1,17$ .

Можно отметить только новое уменьшение  $C_s$  для поля литологических характеристик, хотя процент среднеквадратичной ошибки еще очень велик.

#### Анализ таблицы 4.1.5

Поскольку в этой таблице вид отношений коэффициентов определяется 5 столбцом табл. 3.3.1 ( $V_r^{315}$ ), в котором  $A_3 = 0,000$ , то, соответственно, что весь столбец  $A_3$  оказался заполненным нулями.

Последуем прежнему допущению и примем  $A_3$  ( $V_r^{315}$ ) = 0,0003. Это позволит в табл. 4.1.5 все нули заменить на следующие цифры (сверху вниз): 0,3; - 0,017; - 0,1; При этом дополнительно заполним таблицу 4.1.13.

Таблица 4.1.13 Статистика отношений коэффициентов у полиномов т(x, y) при виде отношений V:VI; V:VIII; V:VIII; V:IX

NoNo	Уравнения	Статистики		
		$\Delta_{ ext{cp}}$	$S_n$	$C_s$
VI	$V_p^{315}$	1,98	1,00	0,5
VII	Z	-0,32	0,26	0,82
VIII	L	-0,28	1,47	5,24
IX	1	1,87	2,14	1,15

Судя по значениям величины  $C_s$  тренд поля реверсивных скоростей  $V_r^{315}$  слабо связан с трендом поля прогрессивных скоростей  $V_p^{315}$  и, по-прежнему, практически не имеет связи с трендами полей батиметрических (Z), литологических (L) и инженерногеологических параметров (I).

#### Анализ таблицы 4.1.6

Tаблица 4.1.14 Статистика отношений коэффициентов у полиномов  $\tau(x, y)$  при виде отношений VI:VII; VI:VIII; VI:IX.

№№	Уравнения	Статистики		
		$\Delta_{ m cp}$	$S_n$	$C_s$
VII	Z	-0,15	0,11	0,75
VIII	L	-0,25	0,85	3,39
IX	I	0,78	0,65	0,85

Среднеквадратичные ощибки  $C_s$  связи  $\tau(x, y)$  скоростного поля  $V_p^{315}$  и полей Z, L и I, как и ранее, все ещё очень велики, хотя для Z и L из всех просмотренных случаев они минимальны.

Таблица 4.1.15

# Статистика отношений коэффициентов у полиномов т(x, y) при виде отношений VIII:VIII; VIII:IX.

NoNo	Vacanta		Статистики	
יייי פורפור	Уравнения	$\Delta_{ m cp}$	Sn	$C_s$
VIII	L	2,68	3,5	1,31
IX	I	-6,92	3,97	0,57

Связь полинома батиметрии (Z) с полиномом инженерногеологических характеристик довольно слабая ( $C_s = 0,57$ ), а с полиномом литологических параметров практически отсутствует, хотя величина  $C_s = 1,31$  здесь существенно меньше, чем при рассмотрении связей с полиномами скоростей.

# Анализ таблицы 4.1.8

Таблица 4.1.16 Статистика отношений коэффициентов у полиномов τ(x, y) при виде отношений VIII:IX

NoNo	Vnавнения		Статистики	
1/67/5	э равнения	$\Delta_{\sf cp}$	S <sub>n</sub>	$C_s$
IX	I	-1,9	1,47	0,78

Для наглядности результатов сравнение полиномов значения  $C_s$  сведём в табл. 4.1.17.

Таблица 4.1.17

Сводная матрица величин  $C_s$  для различных видов отношений полиномиальных коэффициентов (по данным табл. 4.1.9 – 4.1.16). Горизонтальная строка I, II, III, ... IX показывает вид отношения (I – II:II; I:III...; II – II:III; II: IV; и т. д). Вертикальные столбцы I, II,III,... IX показывают номера уравнений сравниваемых полиномов (I –  $V_r^{225}$ ; II –  $V_p^{225}$ ; III –  $V_r^{270}$ ; и т. д).

Панитани		Делимое												
Делитель	· I	II	Ш	IV	V	VI	VII	·VIII	IX					
$V_r^{225}$ I	0	eg ja						100						
$V_p^{225}$ II	0,09	0						a 11						
$V_r^{270}$ III	0,19	0,12	0					٠.						
$V_p^{270}$ IV	0,19	0,24	0,11	0										
$V_r^{315}$ V	0,95	0,96	1,21	1,17	0									
$V_p^{315}$ VI	0,22	0,26	0,14	0,15	- 0,5	0	114	3						
ZVII	0,81	0,88	0,85	0,76	0,82	0,75	0 .	. 7						
. L VIII	12,78	36,72	14,99	8,07	5,24	3,39	1,31	0						
IX	0,71	0,63	0,70	0,74	1,15	0,83	0,57	0,78	0					

На её основе можно сделать следующие выводы:

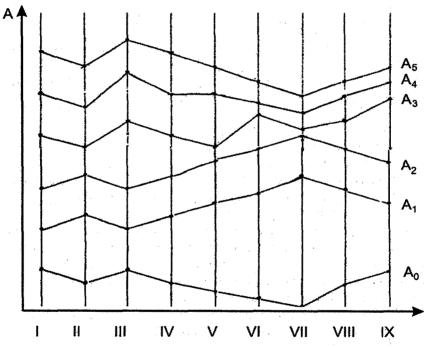
1. Полиномы второй степени по параметрам скоростей придонных течений  $V_r^{225}$ ,  $V_p^{225}$ ,  $V_r^{270}$ ,  $V_p^{270}$ ,  $V_r^{315}$ ,  $V_p^{315}$  мало отличаются между собой. Попарное их сравнение через отношения полиномиальных коэффициентов даёт относительную среднеквадратичную ошибку от 9 до 26 %.

Этот факт говорит о том, что при ветрах юго-западных ( $\alpha=225^{\circ}$ ) и западных ( $\alpha=270^{\circ}$ ) румбов формируются практически идентичные поля природных течений как по реверсивным, так и прогрессивным составляющим. При ветрах северо-западных румбов ( $\alpha=315^{\circ}$ ) только поле прогрессивных природных течений создает близкую к ним гидродинамическую обстановку.

- 2. Полином  $V_r^{315}$  по отношению к остальным гидродинамическим полиномам ведёт себя аномально. Он существенно не похож на них. Для полиномов  $V_{r, p}^{225}$ ,  $V_{r, p}^{270}$  это отличие характеризуется относительной среднеквадратичной ошибкой ( $C_s$ ) от 95 до 117 %. Даже для родственного поля  $V_p^{315}$  это отличие довольно велико ( $C_s = 50\%$ ).
- 3. Связь полиномов гидродинамических полей с полями батиметрических (Z), литологических (L) и инженерно-геологических (I) параметров практически отсутствует. При их сравнении через полиномиальные коэффициенты относительная среднеквадратическая ошибка колеблется от 63 до 3672 %. Наиболее независимым от гидродинамических полиномов оказалось поле литологических характеристик.
- 4. Если рассматривать не абсолютные величины относительной среднеквадратичной ошибки  $(C_s)$ , а ориентироваться на тенденции в их изменении, имея в виду минимальные значения  $C_s$ , то можно сказать следующее:
- полином батиметрических отметок (Z) лучше всего согласуется с полиномами  $V_p^{\ 315}$  и  $V_p^{\ 270}$ , т. е. с полями придонных прогрессивных течений, формируемых северо-западными и западными ветрами;
- полином литологического поля лучше всего согласуется с полем  $V_p^{\,315}$ , формируемым северо-западными ветрами;
- инженерно-геологический полиномиальный фон лучше всего связан с гидродинамическими полями, формируемыми вет-

рами с юго-запада и запада. Наиболее сильное влияние на него должно оказывать поле реверсивных течений, продуцируемых западными ветрами.

Проконтролируем эти выводы с помощью метода знаковой корреляции (см. главу 3) [1]. Для этого построим график поведения полиномиальных коэффициентов  $A_0$ ,  $A_1$ , ...  $A_5$  в произвольно выбранной последовательности уравнений  $\tau(x, y)$ , например, по той которая закреплена в табл. 3.3.1 и использовалась нами в методе отношения коэффициентов (см. рис. 4.1.1). Рисунок достаточно нагляден. Из него видно, что сигналы  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  совпадают полностью:



№№ уравнений полиномов:  $I-V_r^{225}; II-V_p^{225}; III-V_r^{270}: IV-V_p^{270}; V-V_r^{315}; VI-V_p^{315}; VII-Z; VIII-L; IX-I$  А – коэффициенты полиномов  $\tau(x,y)$  без числовых значений.

Рис. 4.1.1. Знаковые изменения полиномных коэффициентов (по табл. 3.3.1.) Наклон линии вниз — уменьшение значения коэффициента  $(A_0, A_1, \dots A_5)$ . Подъем линии — увеличение значения коэффициентов  $(A_0, A_1, \dots A_5)$ .

 $\Pi$ apa  $A_0 - A_1$ .

- Число совпадений знаков приращений  $m_1 = 0$ ;
- Число несовпадений знаков приращений  $m_2 = 8$ ;

$$P = |N| = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} = 1.$$

<u>  $\Pi$ apa  $A_0 - A_2$ .</u>  $m_1 = 0$ ;  $m_2 = 8$ ; P = 1.

В работе [1] для уровня значимости  $\alpha=0,5$  при общем количестве наблюдений 8 даётся критическое число K=0, которое в случае статистически значимого результата должно быть не меньше меньшего из чисел  $m_1$  или  $m_2$ . В нашем случае это условие соблюдается.

<u>Παρα A<sub>0</sub> – A<sub>3</sub>.</u>  $m_1 = 6$ ;  $m_2 = 2$ ; P = 0.5.

Этот результат нельзя считать статистически значимым, так как K < 2 (меньшее число  $m_2 = 2$ ).

Пара  $A_0 - A_4$ .  $m_1 = 7$ ;  $m_2 = 0$ ; P = 1,0.

Результат статистически значим. При  $m_1 + m_2 = 7$ , K = 0 и  $K = m_2$ .

<u> $\Pi$ apa  $A_0 - A_5$ .</u>  $m_1 = 8$ ;  $m_2 = 0$ ; P = 1,0.

Результат статистически значим.

Итоги сравнения полиномов  $\tau(x,y)$  на основе знаковой корреляции оказались настолько просты, что отпадает надобность сведения их в обобщающую матрицу, показанную в табл. 3.4.1. Оказалось, что кроме коэффициента  $A_3$  все остальные как сигналы по знакам приращений совпадают с вероятностью, равной 1. Это означает, что при знаковой мере сходства все полиномы практически совпадают, т. е. взаимосвязаны между собой не только различные гидродинамические поля, но гидродинамические поля связаны хорошо и с полями Z, L, L.

Таким образом, мы видим, что *использование различных мер сходства дает различные результаты*. В этом нет ничего неестественного. Напротив, это нормально. Так, сравнивая кубики разных цветов, мы констатируем их сходство как объектов геометрических, так и их полное различие как объектов цветовых.

В нашем случае мы сравниваем между собой морфологическое и геологическое устройство дна Нарвского залива с гидроди-

намическим устройством его придонного слоя, формируемого за счёт различных ветровых режимов над его акваторией. Это сравнение мы провели на уровне трендов как некого функционального фона.

С точки зрения знаковых приращений коэффициентов полиномов второго порядка, выбранных нами в качестве фоновых уравнений, связь между морфологическими (Z), литологическими (L) и инженерно-геологическими (I) полями, с одной стороны, и гидродинамическими полями, с другой стороны, оказалась вполне определенной. Иными словами, на уровне этой меры сходства все рассмотренные нами ветровые режимы формируют не только природные течения, но оказывают через них прямое воздействие на морфологическое, литологическое и инженерно-геологическое устройство дна.

Этот вывод, на первый взгляд, выглядит тривиальным, но лишь при поверхностном подходе к вопросу. Совершенно не очевидным он является по отношению к конкретным ветровым режимам (по направлению и скорости ветра). В этом смысле полученный результат оказался, хотя и ожидаемым, но новым.

При более жестком сравнении полиномов, проведённом через отношения их коэффициентов, картина взаимосвязи гидродинамических и морфологических полей существенно осложнилась.

Во-первых, сама связь стала выглядеть весьма проблематичной и просматривается лишь на уровне тенденций в уменьшении отношений среднеквадратичной ошибки  $(C_s)$ .

Во-вторых, она оказалась дифференцированной по параметрам:

- 1. Батиметрический фон (Z) контролируется фоном прогрессивных природных течений от ветров западных и северо-западных румбов.
- 2. Литологический фон (L) значительно слабее, чем батиметрический, но всё же находится под некоторым контролем фона прогрессивных придонных течений, формируемых ветрами с северо-запада.
- 3. Инженерно-геологический фон (I) наиболее сильно контролируется фоном реверсивных течений, формируемым ветрами дующими с запада и юго-запада и, особенно, фоном прогрессивных течений от ветров с юго-запада.

## 4.2. Уровень остаточной связи

Остатки от полиномов второго порядка рассматриваются нами как аномалии от функционального тренда. Возможная связь между ними исследовалась с помощью коэффициентов парной корреляции. Некоторый технический дефект, усложнивший эту процедуру, состоял в различном размере ячеек координатной сетки, использовавшейся при построении гидродинамических и батиметрического полей (3х3 км) и литологического и инженерногеологического полей (2×2 км). Он был устроен с помощью программы «Serface».

Результаты корреляционного анализа сведены в табл. 4.2.1.

Таблица 4.2.1 Коэффициенты взаимной корреляции между исследуемыми характеристиками (по результатам обработки «остатков» тренд-поверхности второй степени).

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
геология (I)		٠.		1 1						
Инженерная	9	0,52	0,55	0,61	0,40	0,39	0,63	-0,69	-0,77	1,00
Литология ( <i>L</i> )	8	-0,57	-0,56	-0,64	-0,43	-0,43	-0,68	0,69	1,00	
Батиметрия (Z)	7	-0,70	-0,76	-0,81	-0,65	-0,51	-0,81	1,00		
$V_p = 315^{\circ}, 6.75 \text{ и/c}$	6	0,94	0,92	0;97	0,82	0,80	1,00			
$V_r = 315^{\circ}, 6.75 \text{ m/c}.$	-5	0,88	0,75	0,73	0,71	1,00				
$V_p = 270^{\circ}, 15 \text{ m/c}$	4	0,80	0,89	0,83	1,00					14,
$V_r = 270^{\circ}, 15 \text{ m/c}$	3	0,93	0,89	1,00						
$V_p = 225^{\circ}, 20 \text{ m/c}$	2	0,85	1,00							
$V_r = 225^{\circ}, 20 \text{ m/c}$	1	1,00								

На её основе можно сделать следующие выводы:

- 1. «Остатки» различных скоростных полей коррелируют между собой лучше, чем с «остатками» полей по Z, L, I.
- 2. Среди «остатков» скоростных полей выделяется поле регрессивной составляющей от ветра с северо-запада ( $\alpha=315^0$ , W=6, 75 v/c). Оно хуже остальных коррелирует с «остатками» полей как гидродинамических так и морфо геологических.
- 3. Батиметрические и литологические «остатки» имеют отрицательные коэффициенты корреляции со всеми гидродинамическими «остатками».
- 4. Инженерно-геологические «остатки» со всеми гидродинамическими «остатками» имеют прямую корреляционную связь. Это обстоятельство вызвано, по-видимому, тем, что шкала инже-

нерно-геологических параметров была изначально построена в порядке, обратном по сравнению со шкалами батиметрии и литологии. Если в последних шкалах увеличение чисел соответствовало росту глубины и увеличению в осадке количества мелких фракций, то в инженерно-геологической шкале увеличение чисел показывало улучшение инженерно-геологических свойств пород.

- 5. Батиметрические «остатки» лучше всего коррелируют с «остатками» полей  $V_r^{270}$  и  $V_p^{315}$ , а хуже всего с «остатками» поля  $V_r^{315}$ .
- 6. Литологические «остатки» имеют наиболее высокие коэффициенты корреляции с «остатками» поля  $V_r^{270}$  и  $V_p^{315}$ .
- 7. Инженерно-геологические «остатки» довольно хорошо коррелируют с «остатками» поля  $V_r^{270}$  и  $V_p^{315}$ .

Перечисленные выводы носят чисто констатирующий характер, но приобретают глубокий физический смысл при обсуждении их в контексте с выводами по результатам сравнения полиномов, что видно из рис. 4.2.1.

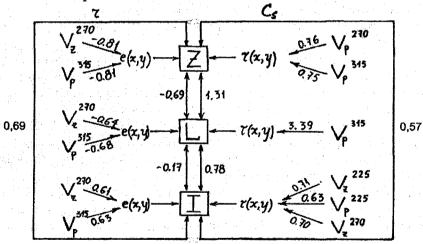


Рис. 4.2.1. Обобщенная схема связи гидродинамических полей придонного слоя  $(V_{r,p})$  с морфологическим (Z), литологическим (L) и инженерно-геологическом (I) полями в Нарвском заливе. Слева — уровень «остатков», r — коэффициенты парной корреляции. Справа — уровень трендов (полиномов второго порядка),  $C_s$  — относительная среднеквадратичная ошибка.

Предложенную на рис. 4.2.1. схему можно рассматривать как некую энергетическую систему:

- 1. Величины V это некоторые клавиши, позволяющие подключить всю цепь к тому или иному «источнику питания». Рассмотрим все возможные случаи ее функционирования в Нарвском заливе.
- 2. Зададим ветровой режим с параметрами  $\alpha=225^\circ$ , W=20 м/с. Этот ветер формирует поля реверсивных  $(V_r^{225})$  и прогрессивных  $(V_p^{225})$  придонных течений.
- 3. В соответствии нашей схемой «включается» правый нижний угол цепи. Эффект от такого «включения» чрезвычайно слабый. Этот ветер через продуцируемые им поля скоростей действует только на инженерно-геологическую ситуацию в заливе и только на уровне полиномов, т. е. оказывает прямое влияние лишь на инженерно-геологический фон. Фон батиметрический и фон литологический «чувствуют» этот ветер лишь опосредованно через поле І. На структурные детали этих полей, выражаемые через «остатки», ветер с юго-запада практически не влияет.
- 4. Ветер  $\alpha = 270^{0}$ , W = 15 м/с. Продуцируемые им природные течения  $V_r^{270}$  и  $V_p^{270}$ .
  - 5. Действие этого ветра в нашей схеме весьма разнообразно:
- через реверсивную составляющую  $V_r^{270}$  «включается» фоновая (полиномиальная) цепь на инженерно-геологическое поле (I), а также на все «остаточные цепи»: I, на L и на Z;
- через прогрессивную составляющую  $(V_p^{270})$  «подключается» участок цепи на фон батиметрического поля (Z- по полиному).
- 6. Таким образом, западный ветер оказывает весьма активное влияние на устройство дна Нарвского залива. Наиболее мощно при этом «работает» реверсивная составляющая природных скоростей  $(V_r^{270})$ , формирующая структурные детали («остатки») батиметрического (Z), литологического (L) и инженерно-геологического (I) полей.
- 7. Ветер  $\alpha=315^0$ , W=6,75 м/с. Продуцируемые им придонные течения  $V_r^{315}$  и  $V_p^{315}$ . На подключение работает только прогрессивная составляющая  $V_p^{315}$ . Наиболее активно она влияет на формирование структурных деталей (остатков) полей Z, L и I, слабее на формирование фона полей Z и L. На фон инженерно-геологического поля влияние северо-западного ветра не проявляется.

Отметим один любопытный факт. Западный ветер ( $\alpha = 270^{0}$ ) воздействует на формирование структурных деталей полей Z, L и I только через реверсивную составляющую, а северо-западный ветер ( $\alpha = 315^{0}$ ) только через состаляющую прогрессивную. На формирование же структурного фона полей Z и L влияет лишь прогрессивная составляющая придонных течений ветра с запада.

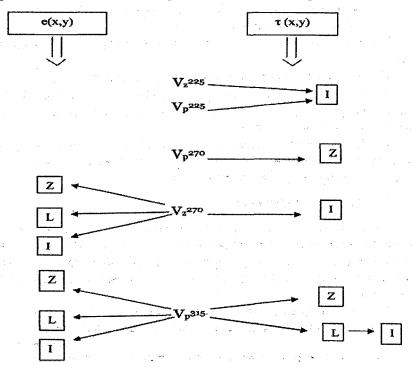


Рис. 4.2.2. Схема воздействия ветровых придонных течений на устройство дна Нарвского залива (морфологическое, литологическое, инженерно- геологическое)

е(х,у) ; т (х,у) — показывают, что слева приведены связи «остатков» (деталей устройства полей); справа — связи трендовые (фонового устройства полей).

Для наглядности того, что сказано в пунктах 1–7 построена схема на рис. 4.2.2. Из неё отчётливо видно, что по воздействию на дно залива определяющей является прогрессивная составляющая северо-западного ветра. Она прямо влияет не только на фор-

мирование фона двух полей Z и L, а через поле L опосредованно и на фон поля I, но прямо определяет и формирование структурных деталей всех трёх полей Z, L, I.

Реверсивная составляющая поля придонных течений от западного ветра ( $\alpha=270^0$ ) в основном действует на детали устройства морфологического, литологического и инженерно-геологического полей. Фоновое же устройство эта составляющая затрагивает только в инженерно-геологическом поле.

Поля  $V_p^{270}$  и  $V_{r,p}^{315}$  почти не влияют на устройство дна, особенно на его детали.

И еще два вывода просматриваются на схеме рис. 4.2.2:

- 1. На инженерно-геологическое устройство дна Нарвского залива (на фон и детали) наиболее полно влияет поле реверсивных течений от западного ветра  $(V_z^{270})$ .
- 2. На морфологическое и литологическое устройство дна (на фон и детали) наиболее полно влияет поле прогрессивных течений от северо-западного ветра ( $V_z^{315}$ ).

## 4.3. Энергетическая связь

От полей скоростей природных течений был сделан переход к полям кинетической энергии природных потоков с помощью скалярных произведений для векторов  $V_p$  и обычных произведений для  $V_r$  на самих себя с учетом  $\cos{(V_p, V_p)}$  для векторов  $V_p$ , см. гл. 1, п. 1.1.).

Результаты такого перехода сведены с табл. 4.3.1, где они даны в форме полиномиальных составляющих второй степени.

Таблица 4.3.1. Значение коэффициентов уравнения тренда второй степени для энергетических характеристик потока у дна (E), батиметрии (Z), литологии (L) и инженерно-геологических условий (I).

Коэф- фици-	$E_r^{225}$	$E_p^{225}$	$E_r^{270}$	$E_p^{270}$	$E_r^{315}$	$E_p^{315}$	Z	L	I
енты							-		
A <sub>0</sub>	3236,2	94,39	10504,8	112,6	64,073	6,99	-10,511	2,797	14,089
A <sub>1</sub>	-68,9	-1,74	-303,8	-4,04	-1,745	-0,214	0,724	0,294	-0,172
A <sub>2</sub>	-117,6	-3,59	-322,0	-3,47	-2,833	-0,188	1,874	0,334	-0,177
$A_3$	0,3	0,01	2,6	0,04	-0,060	0,001	-0,018	-0,003	0,003
A <sub>4</sub>	1,3	0,03	4,7	0,05	0,092	0,004	-0,010	-0,003	0,001
A <sub>5</sub>	1,2	0,04	2,7	0,03	0,049	0,002	-0,010	-0,004	0,001
	^								1 1

Вначале рассмотрим отношения соответствующих коэффициентов этих полиномов:

$$\frac{A_0(V_r)}{A_0(E_r)}, \frac{A_0(V_P)}{A_0(E_P)}$$

$$\frac{A_1(V_r)}{A_1(E_r)}, \frac{A_1(V_P)}{A_1(E_P)}$$

$$\dots$$

$$\frac{A_5(V_P)}{A_5(E_P)}, \frac{A_5(V_P)}{A_5(E_P)}$$

Отдельно для каждого ветра:

$$\alpha = 225^{0}$$
,  $W = 20$  m/c  
 $\alpha = 270^{0}$ ,  $W = 15$  m/c  
 $\alpha = 315^{0}$ ,  $W = 6,75$  m/c

Bettep  $\alpha = 225^{\circ}$ , W = 20 m/c

$$\frac{A_0(V_r)}{A_0(E_r)} = 0,022 \qquad \frac{A_0(V_p)}{A_0(E_p)} = 0,13$$

$$\frac{A_1(V_r)}{A_1(E_r)} = 0,026 \qquad \frac{A_1(V_p)}{A_1(E_p)} = 0,16$$

$$\frac{A_2(V_r)}{A_2(E_r)} = 0,020 \qquad \frac{A_2(V_p)}{A_2(E_p)} = 0,10$$

$$\frac{A_3(V_r)}{A_3(E_r)} = 0,043 \qquad \frac{A_3(V_p)}{A_3(E_p)} = 0,20$$

$$\frac{A_4(V_p)}{A_4(E_p)} = 0,024 \qquad \frac{A_4(V_p)}{A_4(E_p)} = 0,13$$

$$\frac{A_5(V_r)}{A_5(E_p)} = 0,017 \qquad \frac{A_5(V_p)}{A_5(E_p)} = 0,08$$

Better 
$$\alpha = 270^{\circ}$$
,  $W = 15 \text{ m/c}$ 

$$\frac{A_0(V_r)}{A_0(E_r)} = 0,014$$

$$\frac{A_1(V_r)}{A_1(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_2(V_r)}{A_2(E_r)} = 0,012$$

$$\frac{A_2(V_r)}{A_2(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_3(V_r)}{A_3(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_4(V_r)}{A_4(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_4(V_r)}{A_4(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_4(V_r)}{A_4(E_r)} = 0,013$$

$$\frac{A_5(V_r)}{A_5(E_r)} = 0,011$$

$$\frac{A_5(V_r)}{A_5(E_r)} = 0,011$$

$$\frac{A_5(V_r)}{A_5(E_r)} = 0,010$$

$$A_{5}(E_{r})$$
Bettep  $\alpha = 315^{0}$ ,  $W = 6,75$  m/c
$$\frac{A_{0}(V_{r})}{A_{0}(E_{r})} = 0,10$$

$$\frac{A_{1}(V_{r})}{A_{1}(E_{r})} = 0,16$$

$$\frac{A_{2}(V_{r})}{A_{2}(E_{r})} = 0,06$$

$$\frac{A_{3}(V_{r})}{A_{3}(E_{r})} = -0,005$$

$$\frac{A_{4}(V_{r})}{A_{4}(E_{r})} = 0,06$$

$$\frac{A_{4}(V_{r})}{A_{4}(E_{r})} = 0,06$$

$$\frac{A_{4}(V_{r})}{A_{4}(E_{r})} = 0,06$$

$$\frac{A_{5}(V_{r})}{A_{5}(E_{r})} = 0,04$$

$$\frac{A_{5}(V_{p})}{A_{5}(E_{p})} = 0,50$$

Теперь статически обработаем эти столбцы по прежней

программе

программе	··		·
Ветер $\alpha = 225^{\circ}$	δ	S <sub>n</sub>	$C_{s}$
W = 20  m/c		on .	j. <b>–</b> 5
$\delta_{\rm r} = \frac{(V_r)}{(E_r)}$	0,025	0,009	0,37
$\delta_{\mathbf{p}} = \frac{\left(V_{p}\right)}{\left(E_{p}\right)}$	0,13	0,043	0,33
Ветер $\alpha = 270^{\circ}$ W = 15м/c			
$\delta_{\rm r} = \frac{(V_r)}{(E_r)}$	0,013	0,001	0,08
$\delta_{\mathbf{p}} = \frac{\left(V_{p}\right)}{\left(E_{p}\right)}$	0,10	0,013	0,13
Berep $\alpha = 315^{\circ}$			
W = 6.75  m/c			·
$\delta_{\rm r} = \frac{(V_r)}{(E_r)}$	0,07	0,06	0,80
$\delta_{p} = \frac{(V_{p})}{(E_{p})}$	0,58	0,21	0,36

Судя по величине  $C_s$ , полиномы скоростных характеристик заметно отличаются от полиномов, полученных на их основе характеристик энергетических. Исключение могла бы составить только ситуация при ветре  $\alpha = 270^0$ , W = 15m/с. Однако, чтобы дальнейшие результаты были однотипными, включим и эту ситуацию в дальнейшие расчёты. А они будут состоять в том, что мы повторим процедуру вычислений по сравнению полиномов через отношения их коэффициентов. Однако сузим задачу. Не будем сравнивать сразу все полиномы посредством какого-то одного из них как некой меры (I:II; I:III; и т.п.).

Сравним каждый отдельный полином E вначале с полиномом Z, потом с полиномом L, а затем с полиномом I, поскольку именно эти

связи для нас становятся наиболее интересными. Для удобства пользования расчётными характеристиками сведем их в табл. 4.3.2.

Воспользуемся прежней программой и подсчитаем статистики отношений  $\Delta$ ,  $S_n$ ,  $C_s$  (см. табл. 4.3.3).

Порядок цифр и их взаимное соотношение для величины относительной среднеквадратичной ошибки те же, что были при рассмотрении взаимосвязей полей Z, L, I с полями придонных скоростей. Аномально плохо, т.е. независимо от величины E во всех случаях по-прежнему выглядит литологическое поле (L). Ни в каких связях не участвует поле  $E_r$  (на уровне фонового влияния).

Но если, как и ранее, ориентироваться не столько на величины  $C_s$ , сколько на тенденции в их изменении и остановиться минимальных значениях  $C_s$ , то отчётливо выделяется влияние фоновой структуры поля  $E_p^{270}$  на фоновую структуру полей Z, L и I.

 $\begin{tabular}{ll} $\it Taблицa~4.3.2 \\ \end{tabular}$  Отношение соответствующих коэффициентов  $\Delta$  у полиномов  $\tau(x,y)$ 

			_				
Отнош	OTTUG			Коэфф	ициент		
OTHOL	сния	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
	Z	-307,8	-95,2	-62,2	-16,7	-130,0	-120,0
$E_r^{225}$	L	1157,0	-234,4	-352,1	-100,0	-433,3	-300,0
	I	229,7	400,6	664,4	100,0	1300,0	1200,0
	Z	-9,0	-2,4	-1,9	-0,56	-3,0	-4,0
$E_p^{225}$	L	33,7	-5,8	-10,7	-3,3	-10,0	-10,0
1	I	6,7	9,9	20,3	3,3	30,0	40,0
	Z	-999,4	-419,6	-171,8	-144,4	-470,0	-270,0
$E_r^{270}$	L	3755,7	-1033,3	-964,1	-866,7	-1566,7	-675,0
	I	745,6	1766,3	1819,2	866,7	4700,0	2700,0
	Z	-10,7	-5,6	-1,8	-2,2	-5,0	-3,0
$E_p^{270}$		40,2	-13,7	-10,4	-13,3	-16,7	-7,5
	I	8,0	23,5	19,6	13,3	50,0	30,0
	Z	-6,1	-2,4	-1,5	3,3	-9,2	-4,9
$E_r^{315}$	L	22,9	-6,0	-8,6	20,0	-30,7	-12,2
	I	4,5	10,1	16,0	-20,0	92,0	49,0
	Z	-0,66	-0,3	-0,1	-0,06	-0,4	-0,2
$E_p^{315}$	L	2,5	-0,7	-0,6	-0,3	-1,1	-0,5
	I	0,5	1,2	1,1	0,3	4,0	2,0

Статистика отношений коэффициентов для полиномов  $\tau(x,y)$  по E, Z, L,I. По строкам табл. 4.3.2)

2									Отноп	пения								
CIAINC	:	$E_{r}^{225}$			$E_{p}^{225}$			$E_r^{270}$			$E_{p}^{270}$			$E_r^{315}$		`	$E_p^{315}$	
LANA	Z	7	I	Z	7	I	Z	7	Ι	Z	T	I	Z	T	I	Z	T	I
γ	[-122]	43,8	649	-3,5	-1,0	18,4	-412	-225 2100		-4,7	-3,6	24,1	-3,5	-2,4	25,3	-0,29	-0,12	1,5
$S_n$	100	599	503	2,9	17,2	14,4	315	1973	1460	3,3	21,7	14,8	4,3	20,4	39,5	0,22	1,3	1,3
ڻ	0,81	13,67 0,78		0,84	0,84   17,2   0,78   0,76   8,76   0,70	0,78	92,0	8,76	0,70	0,70	6,02 0,62 1,23 8,52 1,56 0,76	0,62	1,23	8,52	1,56	0,76	10,9	6,0

Таблица 4.3.4 Коэффициенты взаимной корреляции между скоростными и энергетическими характеристиками (по везультатам обработки «остатков» тренл-поверхности второй степени)

	_		_		_		_		_		,	
											1,00	12
										1,00	0,58	11
									1,00	0,49	82,0	10
								1,00	92,0	0,44	68'0	6
							1,00	0,62	0,84	0,80	0,77	8
						1,00	0,85	0,81		0,80	0,85	7
					1,00	0,76	0,64	0,93		0,45	0,93	9
				1,00	0,74		0,83	0,74	89,0	0,0	5,83	2
			1,00	0,73	98'0	0,77	0,75	06'0	0,92	0,48	0,85	4
		1,00	0,85	99'0	96'0	0,71	0,55	96,0	99,0	0,37	0,84	3
	1,00	0,82	68'0	0,83	0,88	0,87	06'0	0,84	0,85	99'0	0,88	2
1,00	06'0	0,91	98'0	0,87	0,92	0,93	0,74	0,95	0,73			1
1	2	3	4	. 2	9	7	8	6	10	11	12	
$V_r = 225^0, 20 \text{ M/c}$	$V_p = 225^0, 20 \text{ M/c}$	$V_r = 270^0$ ., 15 M/c	$V_p = 270^0$ , 15 M/c	$V_r = 315^0, 6,75 \text{ M/c}$	$V_p = 315$ , 6,75 M/c	$E_r^{225}$ (1)^2)/2	$E_p^{225}(2)^{\wedge}2)/2$	$E_r^{270}$ (3)^2)/2	$E_p^{270} (4)^{4} (2)^{2}$	$E_r^{315}(5)^{4}$ 2)/2	$E_p^{315}$ (6)^2)/2	
	1	1 1,00 2 0,90	1 1,00 2 0,90 1,00 3 0,91 0,82	1 1,00 2 0,90 1,00 3 0,91 0,82 1,00 4 0,86 0,89 0,85	1 1,00 2 0,90 1,00 4 0,86 0,89 0,85 1,00 5 0,87 0,83 0,66 0,73	1     1,00       2     0,90     1,00       3     0,91     0,82     1,00       4     0,86     0,89     0,85     1,00       5     0,87     0,83     0,66     0,73     1,00       6     0,92     0,88     0,96     0,86     0,74	1       1,00         2       0,90       1,00         3       0,91       0,82       1,00         4       0,86       0,89       0,85       1,00         5       0,87       0,83       0,66       0,73       1,00         6       0,92       0,88       0,96       0,86       0,74       1,00         7       0,93       0,87       0,71       0,77       0,94       0,76	1         1,00           2         0,90         1,00           3         0,91         0,82         1,00           4         0,86         0,89         0,85         1,00           5         0,87         0,83         0,66         0,73         1,00           6         0,92         0,88         0,96         0,86         0,74         1,00           7         0,93         0,87         0,71         0,77         0,94         0,76         1,00           8         0,74         0,90         0,55         0,75         0,83         0,64         0,85	1         1,00           2         0,90         1,00           3         0,91         0,82         1,00           4         0,86         0,89         0,85         1,00           5         0,87         0,83         0,66         0,73         1,00           6         0,92         0,88         0,96         0,86         0,74         1,00           7         0,93         0,87         0,71         0,77         0,94         0,76         1,00           8         0,74         0,90         0,55         0,75         0,83         0,64         0,85         1,00           9         0,95         0,84         0,96         0,96         0,74         0,93         0,81         0,62	1         1,00           2         0,90         1,00           3         0,91         0,82         1,00           4         0,86         0,89         0,85         1,00           5         0,87         0,88         0,66         0,73         1,00           6         0,92         0,88         0,96         0,86         0,74         1,00           7         0,93         0,87         0,71         0,77         0,94         0,76         1,00           8         0,74         0,90         0,55         0,75         0,83         0,64         0,85         1,00           9         0,95         0,84         0,96         0,90         0,74         0,93         0,81         0,62         1,00           10         0,73         0,85         0,66         0,90         0,74         0,93         0,81         0,62         1,00	1         1,00         ————————————————————————————————————	1         1,00

По техническим причинам, к сожалению, не удалось построить поля «остатков» для параметров  $E_{\rm r,p}$ . Поэтому о возможном влиянии «остаточной» энергии придонных потоков на формирование деталей устройства полей Z, L, I (полей их «остатков») мы будем судить на основе результатов парных корреляций между  $E_{\rm r,p}$  и  $V_{\rm r,p}$  (см. табл. 4.3.4).

На рисунке.4.2.1 дана обобщенная схема связи полей Z, L, I и  $V_{\rm r,p}$ . Левая часть рисунка показывает часть «остатков» (деталей устройства этих полей). Оказалось, что структурные детали полей Z, L, I контролируются лишь двумя параметрами  $V_r^{270}$  и  $V_p^{315}$ . Таблица 4.3.4 показывает, что поле «остатков»  $V_r^{270}$  имеет наиболее высокий коэффициент корреляции с полем «остатков»  $E_r^{270}$  (r=0.96), а поле  $V_p^{315}$  — с полем  $E_p^{315}$  (r=0.93). Это обстоятельство дает нам право в новую обобщенную схему связи полей  $E_{\rm r,p}$  и полей Z, L, I на место  $V_r^{270}$  и  $V_p^{315}$  поставить соответствующие им энергетические характеристики:  $E_r^{270}$  и  $E_p^{315}$ . С учетом этих фактов построим рис. 4.3.1.

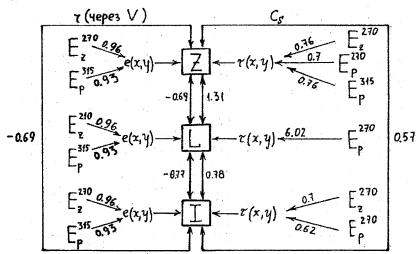


Рис. 4.3.1 Обобщенная схема связи энергетических полей придонных потоков  $(E_r, E_p)$  с морфологическим (Z), литологическими (L) и инженерногеологическим (I) полями в Нарвском заливе. Слева — уровень «остатков», Z — коэффициент парной корреляции  $E_{\rm rop}$  с соответствующими характеристиками  $V_{\rm rop}$ . Справа — уровень трендов (полиномов второго порядка),  $C_s$  — относительная среднеквадратичная ошибка.

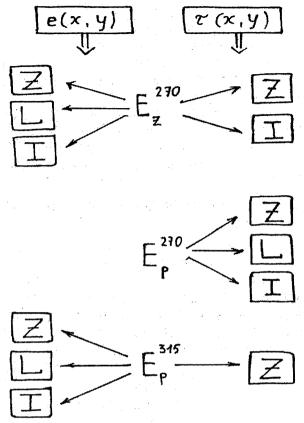


Рис. 4.3.2. Схема влияния энергии придонных потоков на устройство дна Нарвского залива (морфологическое, литологическое, инженерно-геологическое).

е(x,y) ; т (x,y) показывает, что слева приведены связи «остатков» (деталей устройства полей); справа — связи трендовые (фонового устройства полей).

Сравнивая этот рисунок с рис. 4.2.1, можно отметить следующее:

- «остаточные» связи  $E_{\rm r,p}$  (Z, L, I) полностью повторяют остаточные связи  $V_{\rm rp}$  (Z, L, I).
- полиномиальные (фоновые) связи частично совпадают со связями  $V_{r,p}(Z,L,I)$ , но появляются заметные отличия. На фоновую

структуру батиметрического поля (Z) оказывают влияние помимо  $V_p^{270}$ ,  $V_p^{315}$ ,  $E_p^{270}$ ,  $E_p^{315}$  ещё и поле  $E_r^{270}$ .

На фоновую структуру литологического поля (L) весьма слабое, но вполне вероятное влияние оказывает поле  $E_p^{\ 270}$  (помимо  $V_p^{\ 315}$ ). А на фоновую структуру инженерно-геологического поля (I) воздействуют уже новые поля  $E_r^{\ 270}, E_p^{\ 270}$ .

Иными словами, в энергетическом аспекте главным формирующим фактором для дна Нарвского залива становится ветер с запада ( $\alpha=270^{\circ},\ w=15$  м/с). Это хорошо видно на рис. 4.3.2. Через составляющую  $E_p^{\ 270}$  он воздействует на фоновые структуры  $Z,\ L,\ I,$  а через  $E_r^{\ 270}$  — на структурные детали этих полей.

# 4.4. Модель формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе.

Настало время вернуться к тем концептуальным схемам, которые были даны в начале работы (см. главу 1).

Используя результаты, приведенные на рис. 4.2.1, 4.2.2, 4.3.1 и 4.3.2, воспроизведем блок-схему формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе, показанную на рис. 1.2.2 (глава 1). Но это воспроизведение мы сделаем уже отдельно для двух из рассмотренных нами ветровых режимов (рис. 4.4.1, 4.4.2).

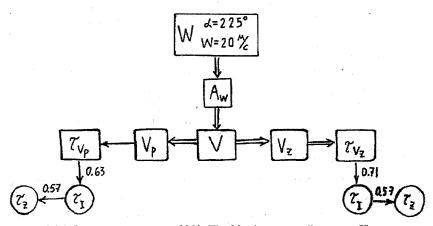


Рис. 4.4.1. Влияние ветра с  $\alpha=225^\circ$ , W=20 м/с на устройство дна Нарвского залива. Числа у стрелок — значения относительной среднеквадратичной ошибки отношений соответствующих коэффициентов у полиномов.

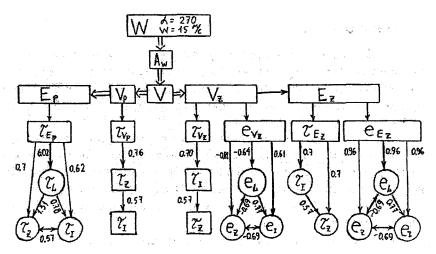


Рис. 4.4.2. Влияние ветра с  $\alpha = 270^{\circ}$ , W = 15 м/с на устройство дна Нарвского залива

Числа у стрелок: для  $\tau(x,y)$  — значения относительной среднеквадратичной ошибки отношений соответствующих коэффициентов у полиномов ( $C_s$ ); для e(x,y) — парный коэффициент корреляции между параметрами  $V_r$  и параметрами Z, L, I (числа без черты); числа с чертой внизу являются коэффициентами парной корреляции между «остатками»  $V_r$  и  $E_r$  — характеризуют связь  $E_z$  с параметрами Z, L, I опосредовано.

# Основные итоги по разделу II

Получены связи между гидродинамическими параметрами и характеристиками морфологического, литологического и инженерно-геологического устройства дна, позволяющие не только прогнозировать особенности литодинамической обстановки в заливе, но и предлагать новые рекомендации по управлению этой обстановкой через воздействие на волновую ситуацию, например, через систему волноломов.

#### Заключение

- 1. Исследование вопросов формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе впервые было проведено не только на основе геологических материалов, но и на базе полей придонных течений, построенных для заданных ветровых режимов по специальной программе.
- 2. Привлечение к решению задачи новой группы параметров (скоростей придонных течений) привело к необходимости перевода традиционной формы литологической и инженерно-геологической карт в числовую форму на основе иерархической шкалы.
- 3. Таким образом, была получена новая система карт более мелкого масштаба (1:500 000):
- придонных течений по реверсивной и прогрессивной составляющим;
  - батиметрическая;
  - литологическая и инженерно-геологическая.
- 4. Литологическая и инженерно-геологическая карты, в отличие от исходных карт, построенных в обычных легендах, были сделаны на континуальной основе.
- 5. Для сравнения карт был использован тренд-анализ, позволивший провести сравнительную процедуру на двух уровнях:
  - систематическом в форме полинома второй степени;
  - случайном, в форме трендового остатка.
- 6. Построена модель формирования литодинамической обстановки в Нарвском заливе. Модель выполнена в виде блок-схемы, связи в которой выражены через коэффициенты парной корреляции для «остатков» и относительные среднеквадратичные ошибки отношений коэффициентов сравниваемых полиномов. Коэффициенты корреляции отражают взаимосвязь структурных деталей рассматриваемых параметрических полей, а относительные среднеквадратичные ошибки связь структур фона.
- 7. Выявлена генетическая роль каждого из выбранных для анализа ветров.
- 8. Оказалось, что наиболее активно на дно Нарвского залива влияют ветры западных румбов.

Эта работа, выполненная для конкретного объекта, имеет достаточно общее методологическое и методическое значение. В ней не только показаны принципы решения задачи по формированию литодинамической обстановки на мелководных полузамкнутых акваториях, но достаточно детально проработана процедурная сторона решения.

Насколько нам известно, это первый опыт реализации традиционного картографического материала среднего масштаба в решении задачи формирования с привлечением в качестве причинных параметров характеристик силовых полей, определяющих механизм функционирования дна как морфологического, литологического и инженерно-геологического объекта.

# Литература

- 1. *Девдариани А.С.* Сигналы из глубин Земли и её геологического прошлого. М.: Недра, 1974. 104 с.
- 2. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 1, 2. М.: Недра, 1990. 319 с., 427 с.
- 3. Коротков А. И., Павлов А.Н., Юровский Ю.Г. Гидрогеология шельфовых областей. Л.: Недра Л.О., 1980. 219 с.
- 4. *Крамбейн У., Кауфман М., Мак-Кеммон Р.* Моделирование геологических процессов. М.: Мир, 1973. 153 с.
- 5. *Павлов А.Н.* Геофизика. СПб.: РГГМУ, 2006. 453 с.
- 6. Фондовые материалы ВСЕГЕИ.
- 7. Фондовые материалы ПГО «Севзапгеология».

#### Оглавление

Предисловие	5
Введение	6
Раздел I. Теоретические и натурные исследования процесса осадкообразова-	
ния в условиях мелководных акваторий	8
Глава 1. Постановка задачи	8
1.1. Содержание задачи	8
1.2. Концептуальная модель	11
1.3. Вопрос о начальных условиях	15
1.4. Вопрос о граничных условиях	20
1.5. Основные параметры и шкалы измерений	21
Глава 2. Исходный фактический материал	25
2.1. Данные по ветровому режиму	25
2.2. Батиметрия и геометрия границ	26
2.3. Литологическая обстановка	30
2.4. Инженерно-геологические условия	34
Основные итоги по разделу I	40
Раздел II. Разработка процедуры построения модели формирования литодинамической и инженерно-геологической обстановки в условиях	
воздействия на дно акватории ветровых течений	41
Глава 3. Методика решения задачи и информация для неё	41
3.1. Построение полей природных течений	41
3.2. Формализация литологической и инженерно-геологической карт	47
3.3. Использование тренд-анализа.	56
3.4. Способы поисков связей между информационными структурами гид-	~~
родинамических и геологических полей	65
Глава 4. Связь морфологических, литологических и инженерно-геологичес-	<b>~</b> 0
ких условий со структурами ветровых придонных течений	68
4.1. Уровень связи полиномов второго порядка	68 80
4.2. Уровень остаточной связи	80 84
4.3. Энергетическая связь.	04
4.4. Модель формирования литодинамической обстановки в Нарвском	92
Заливе	93
Заключение	93
Пителатура	96

# Content

#### Научное издание

### Павлов Александр Николаевич

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ЛИТОДИНАМИЧЕСКУЮ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ ДНА В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ (на примере Нарвского залива)

#### Монография

Редакторы: И.Г. Максимова, О.С. Крайнова Компьютерная верстка Н.И. Афанасьевой

ЛР № 020309 от 30.19.96.

Подписано в печать 07.02.11. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 6,2. Тираж 250 экз. Заказ № 01/11 РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98. ЗАО «НПП «Система», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1.

91200

A STATE OF THE STA

and the second of the second o

green to the second second