



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра комплексного управления прибрежными зонами

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Исследование динамики вод и распределения донных наносов в  
Балтийском проливе и прилегающей акватории Юго-Восточной Балтики

Исполнитель Закиров Руслан Баядитович

Руководитель доцент, к.ф.-м.н. Еремина Татьяна Рэмовна

Консультант к.ф.-м.н. Чубаренко Борис Валентинович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ доцент, к.г.н. Н.Л. Плинк

« 9 » 06 2017 г.

Санкт-Петербург  
2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра промышленной океанологии и охраны природных вод

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(магистерская диссертация)

На тему Исследование динамики вод и распределения донных наносов в Балтийском проливе и прилегающей акватории Юго-Восточной Балтики

**Исполнитель** Закиров Руслан Баядитович

**Руководитель** доцент, к.ф.-м.н. Еремина Татьяна Рэмовна

**Консультант** к.ф.-м.н. Чубаренко Борис Валентинович

«К защите допускаю»

**Заведующий кафедрой** \_\_\_\_\_ доцент, к. ф.-м. н. Т.Р.Еремина

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт-Петербург  
2017

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ .....	5
1.1 Географическое описание и рельеф дна.....	5
1.2 Гидрометеорологический режим .....	6
1.3 Транспорт донных наносов.....	8
1.4 История регулирования транспорта наносов в Балтийском проливе.....	9
2. АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИИ В КАЛИНИНГРАДСКОМ МОРСКОМ КАНАЛЕ ПО ДАННЫМ ЕЖЕГОДНЫХ ПРОМЕРОВ ГЛУБИН .....	13
2.1 Исходные данные.....	13
2.2 Результаты анализа динамики морфометрии.....	15
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ДНА	25
3.1 Исходные уравнения.....	26
3.2 Описание модели Балтийского моря BSM-2010 .....	28
3.3. Локальная модель Гданьского залива.....	31
3.4 Локальная модель Балтийского пролива.....	33
3.5 Анализ результатов.....	35
3.5.1 Результаты расчетов при западном ветре.....	35
3.5.2 Результаты расчета при северном ветре.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	65
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	67

## **ВВЕДЕНИЕ**

Район исследования охватывает эрозионную депрессию на входе в Калининградский Морской канал, прилегающую акваторию Балтийского пролива и акваторию восточной части Гданьского залива. Депрессия образовалась после возведения выдвинутых в море оградительных молов с целью защиты судоходного Морского канала от вдольберегового транспорта донных наносов в заливе (1767г- 1840г) [15]. Именно в пределах этого района осуществляется наиболее мощный транспорт наносов, направление и величина которого были предметом исследований в последнее столетие. [3-7,10,15]. Эрозионная депрессия на входе в Морской канал является типичным морфометрическим проявлением при возмущении вдольбереговых течений выступающим в море препятствием (южный и северный мол) [10]. Анализ динамики морфометрии по данным ежегодных промеров глубин на входе в Морской канал может дать четкое представление о процессе эволюции эрозионной депрессии и указать на преобладающее направление транзита донных наносов в районе исследования, это является актуальностью данной работы.

**Цель работы** – представить анализ динамики морфометрии эрозионной депрессии на входе в Калининградский Морской канал по данным ежегодных промеров глубин, на его основе дать оценку процессу эволюции депрессии, сравнить результаты анализа с результатами математического моделирования деформации дна в районе исследования с применением программного комплекса CARDINAL.

### **Задачи работы:**

1. Выполнить анализ многолетней динамики морфометрии эрозионной депрессии на входе в Калининградский Морской канал по данным ежегодных промеров глубин.

2. Выполнить математическое моделирование деформации дна в районе исследования с применением программного комплекса CARDINAL

3. Сравнить результаты анализа многолетней динамики морфометрии и математического моделирования деформации дна в районе исследования

## **1. ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ**

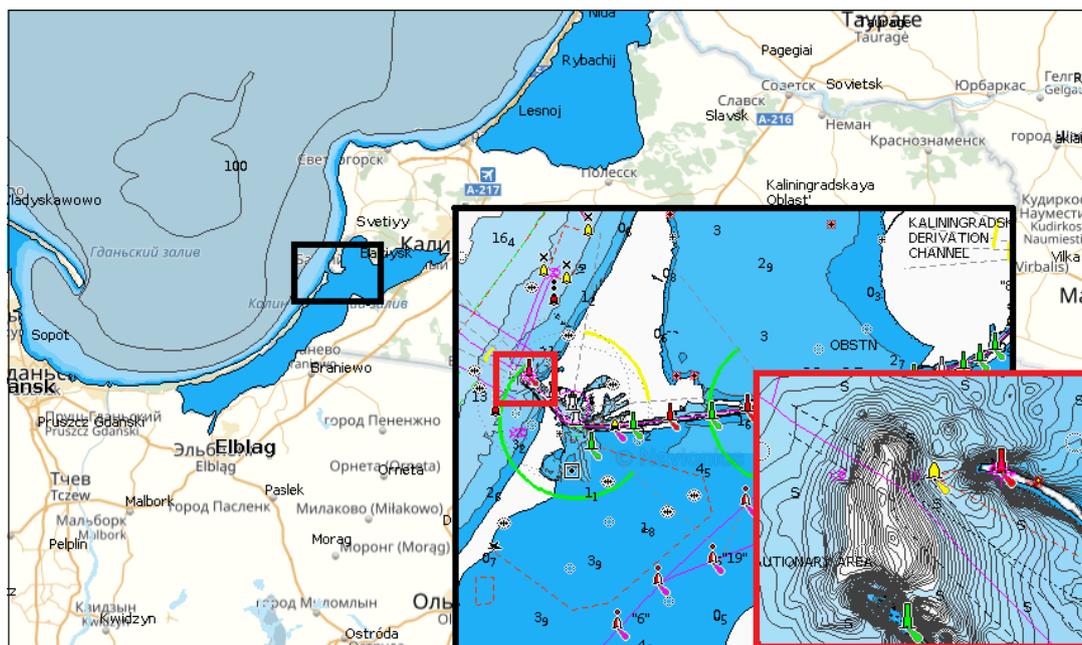
Со второй половины восемнадцатого века восточное побережье Гданьского залива от устья реки Висла до мыса Таран, включая побережье прилегающего Вислинского залива подвержены интенсивной хозяйственной деятельности [4]. Благодаря гидрометеорологическим особенностям района исследования у восточного побережья Гданьского залива формируется вдольбереговой транспорт донных наносов под влиянием которого находится все восточное побережье залива [10].

### **1.1 Географическое описание и рельеф дна.**

Балтийский пролив вытянут с юго-востока на северо-запад и искусственно удлинен морскими молами (северный и южный), ориентированными перпендикулярно береговой линии Гданьского залива и выступающими до изобаты 15м. Молы служат входными воротами в Калининградский морской канал. Длина пролива 2км, ширина около 0.4км, проектная глубина фарватера канала 10.5м [3, 4].

Придонная эрозионная депрессия расположена на входе в Балтийский пролив, соединяющий Гданьский и Вислинский заливы (рис 1) и примыкает к оголовку оградительного южного мола и пересекает фарватер канала с юга на север [3,4,10]. Максимальная глубина депрессии 31 м.

Побережье Гданьского залива имеет дугообразную форму, вытянутую с северо-востока на юго-запад плавно переходящую в широкий пляж [1] (рис 1). Южнее входа в пролив побережье Вислинской косы подвержено активной эрозии, в результате чего на сегодняшний день пляж практически размыт, а близлежащий поселок Коса подвержен затоплению. Севернее входа в пролив, действует процесс аккумуляции песчаного материала по принципу входящего угла, что обеспечивает прирост новых территорий в районе городского пляжа г. Балтийска [3,5, 6].



**Рисунок 1 географическое положение района исследования**

## **1.2 Гидрометеорологический режим**

Гидрометеорологический режим ЮВБ характеризуется преобладанием ветров западных румбов, которые формируют режим течений Гданьского залива и прилегающих к нему акваторий [1,2,8,12].

На протяжении года, в регионе отмечается преобладание западных и юго-западных ветров со средней скоростью 4.1 м/с [8]. Осенне-зимний период характеризуется преобладанием штормовых ветров со скоростью 10 м/с. Средняя продолжительность такого шторма составляет около 3х суток, но в некоторых случаях длительность сильного шторма достигает 10 дней. Еще реже бывают шторма со скоростью ветра 15-20 м/с и продолжительностью меньше суток. [8] На протяжении любого шторма направление ветра может меняться резко и хаотично. С середины апреля до конца лета наступает так называемое «штормовое затишье», исключением являются теплые южные циклоны, врывающиеся в регион с юго-востока [1,2,12].

В таблице 1 предоставлены результаты расчета обеспеченности максимального ветра (1, 3, 5 раз в 100 лет) с метеостанции Балтийск за 1991-2015гг по всем направлениям [8]. При 5% обеспеченности максимальная

скорость ветра 28.8м/с получена для западного ветра, далее по убыванию следуют ветра: северного направления – 25.8м/с, северо-западного – 22.9м/с, юго-западного - 21.7м/с, южного – 18.2м/с и др.

**Таблица 1 Распределение скоростей ветра по направлениям и обеспеченности по Гумбелю на метеостанции Балтийск за 1991 - 2015 гг[8]**

Градации ветра на станции БАЛТИЙСК 1.1.1991 - 1.12.2015 72803 измерений, 4.82 % штилей, Ср. скор. 4.10 м/с Максимальный ветер 28.0 м/с 270° 25.01.1993																		
	1-2 м/с	3-4 м/с	5-6 м/с	7-8 м/с	9-10 м/с	11-12 м/с	13-14 м/с	15-16 м/с	17-18 м/с	19-20 м/с	21-22 м/с	23-24 м/с	> 24 м/с	Ср.ск.	Р %	5%м/с	3%м/с	1%м/с
С %	43.229	30.182	12.240	11.003	2.044	0.768	0.208	0.104	0.130	0.013	0.026	0.026	0.026	3.79	11.084	25.8	28.1	33.2
СВ %	70.453	22.465	5.381	1.403	0.253	0.023	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	2.35	6.277	14.1	15.4	18.2
В %	66.862	27.131	4.828	0.947	0.186	0.028	0.009	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.47	15.543	13.7	14.9	17.4
ЮВ %	61.637	29.032	7.369	1.407	0.352	0.111	0.056	0.019	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000	2.64	7.795	16	17.6	20.8
Ю %	31.426	34.452	21.630	9.191	2.505	0.628	0.084	0.069	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	4.05	18.843	18.2	19.4	21.8
ЮЗ %	16.571	24.566	23.507	19.201	9.612	4.521	1.190	0.559	0.131	0.143	0.000	0.000	0.000	5.75	12.132	21.7	22.9	25.4
З %	15.702	18.964	21.089	19.078	12.416	6.882	2.934	1.635	0.613	0.384	0.057	0.229	0.016	6.58	17.656	28.8	30.7	34.8
СЗ %	25.014	26.163	20.363	18.092	5.551	2.852	1.149	0.540	0.111	0.097	0.069	0.000	0.000	5.12	10.426	22.9	24.3	27.3

В районе исследования в зависимости от действующего поля ветра формируется несколько типов течений, присущих отдельным акваториям. В Гданьском заливе вдоль всего побережья господствует вдольбереговой поток [3,10], а в Балтийском проливе формируется режим входных и выходных течений [1,3].

Вдольбереговой поток Гданьского залива направлен на север или на юг в зависимости от конфигурации действующего поля ветра. На своем пути у входа в морской канал течение встречается с препятствием в виде морских молов и частично отклоняется в сторону открытого моря[10].

В Балтийском проливе наблюдается сложный тип циркуляции, выраженный входными и выходными течениями, крайне нестабильными и постоянно меняющимися. По ориентации в разрезе пролива течения делятся на однослойные, двухслойные и двухструйные (рис 2). По повторяемости течения имеют преимущественно одностороннее направление по всей глубине и ширине, двухструйные и двухслойные течения формируются только во время перестройки направления ветра. Средняя скорость

однослойного потока в проливе около 10-40 см/сек, при двухслойном или двухструйном режимах течений скорости небольшие, около 10 - 20 см/сек[2].

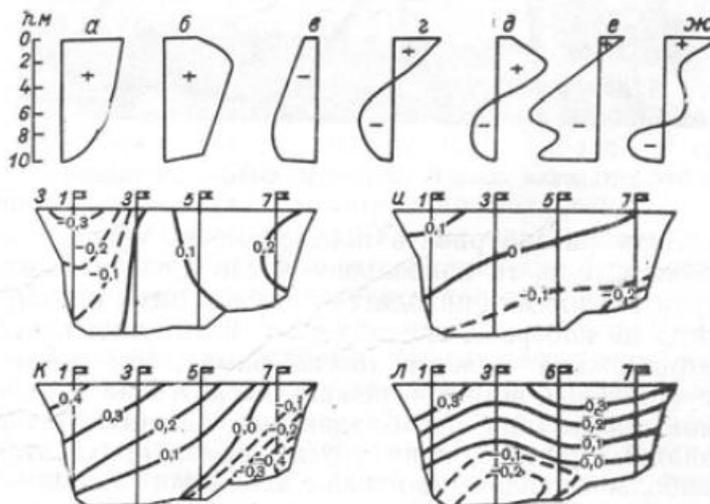


Рисунок 2 Эпюры и сечения скоростей течений в Балтийском проливе [2]

### 1.3 Транспорт донных наносов.

Из-за особенностей конфигурации побережья, в Гданьском заливе формируется вдольбереговое течение обеспечивающее перенос песчаного материала (рис 3). Направление вдольберегового потока зависит от действующего поля ветра над акваторией залива, при этом ветра западных румбов активизируют перенос с юга на север, а ветра восточных румбов с севера на юг [10]. Часть переносимого материала под действие входных выходных течений Балтийского пролива заносится в морской канал [3,4,5,10,15]. По существующим оценкам скорость поступления седиментационного материала из моря в Вислинский залив составляет около 30,6 тыс. т/год [6]. В связи с этим службой Калининградского Морского канала ежегодно проводятся работы по поддержанию рабочих глубин фарватера (10.5м) [4].

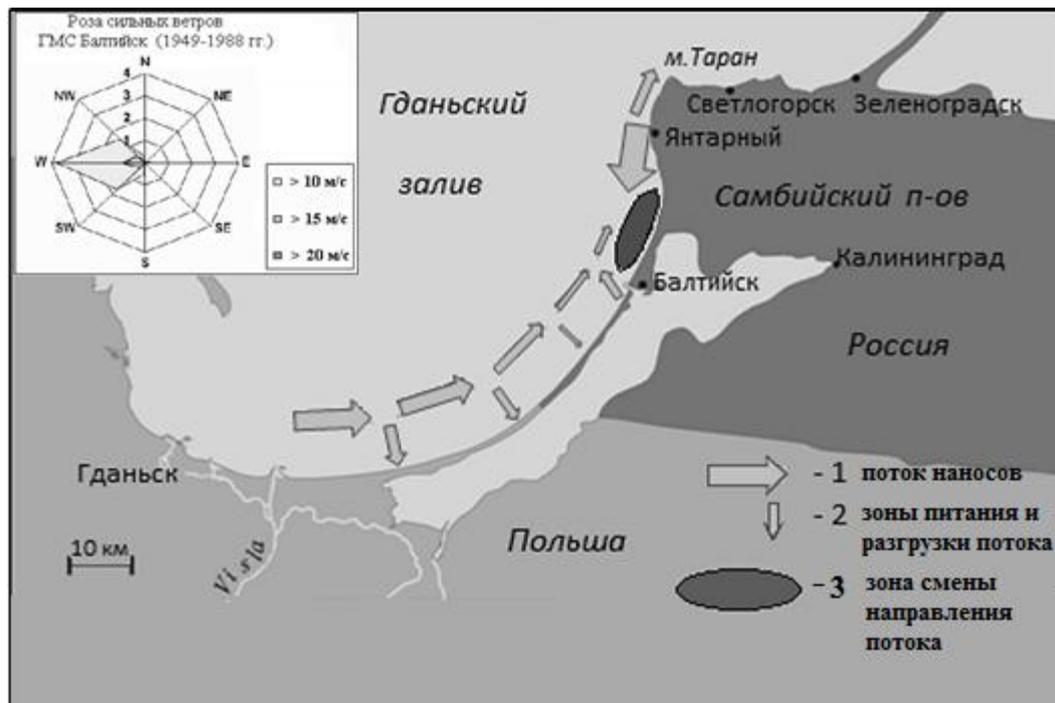


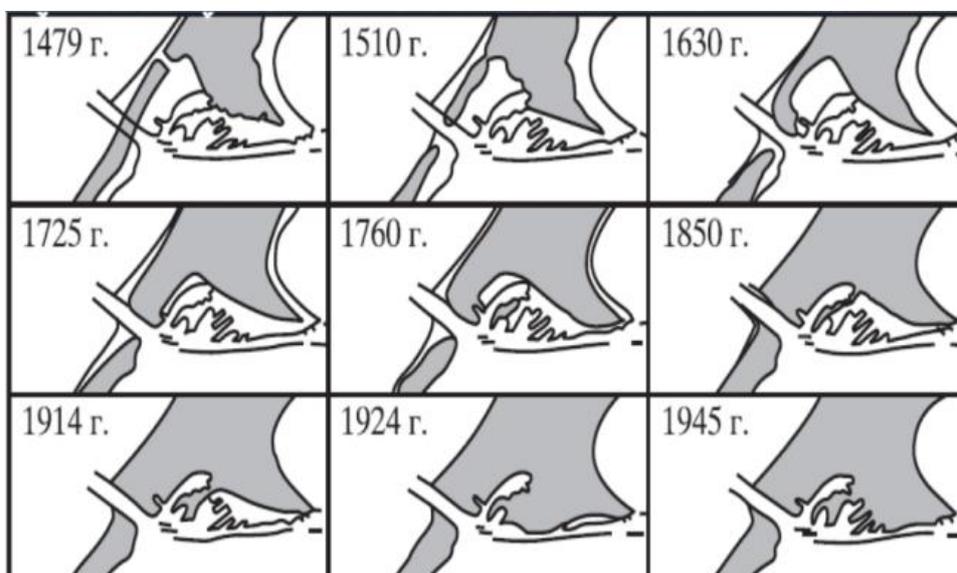
Рисунок 3 Схема транспорта донных наносов у восточного побережья Гданьского залива [10]

#### 1.4 История регулирования транспорта наносов в Балтийском проливе.

Балтийский пролив образовался естественным путем в результате размыва Вислинской косы под действием сильного шторма в 1510г. По имеющимся данным [15], пролив был достаточно широким и мелководным, а после сильных штормов в проливе возникали новые и исчезали старые отмели [4]. В период с 1767 – 1840гг в связи со строительством портов Пиллау и Кёнигсберг и ростом судоходства в проливе стали проводиться дноуглубительные и берегоукрепительные работы [4,15]. Немецкими гидротехниками были приняты меры к сужению пролива для усиления промывного режима и как следствие, естественному углублению русла – были сооружены южный (1767-1768гг) и северный (1840г) мола из каменных глыб, выдвинутых в море до отметки глубины 5,5 м [3, 15]. В результате, глубина русла пролива увеличилась с 3м до 7м.

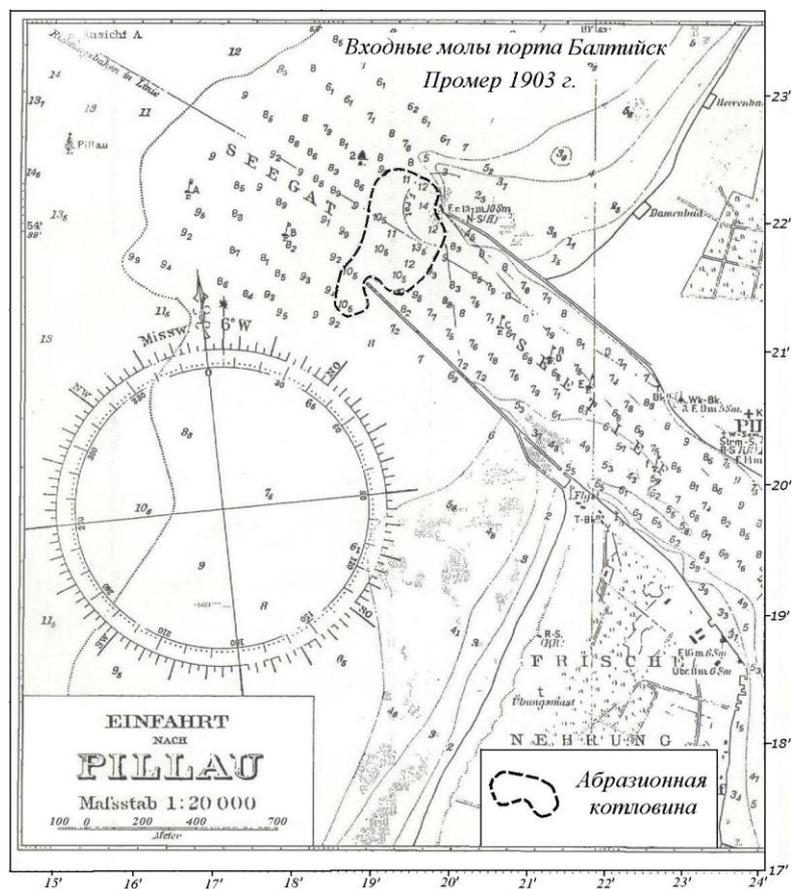
После строительства южного мола, был частично перекрыт вдольбереговой поток наносов, часть которого, захватываясь входными течениями пролива, заносилась вглубь Морского канала, образуя подводные отмели [15]. Только после строительства северного мола удалось перекрыть

поток донных наносов, направив его в сторону моря [15]. Таким образом, как отмечено в [15], при строительстве гидротехнических сооружений вдоль восточного побережья Гданьского залива преобладали вдольбереговые течения направленные с севера на юг.



**Рисунок 4 Эволюция берегов в районе Балтийска (Пиллау) 1479-1945гг.[15]**

С 1871 по 1883гг. началась реконструкция северного и с 1883-1887гг. южного молов. Новые гидросооружения состояли из бетонных блоков, длина оконечности молов увеличена до глубин 10 м, а ориентировка северного мола изменена поворотом 175 м длины его конечности внутрь канала на ( $5^0$ ) – ширина входных ворот Морского канала 150м. [15]. Все эти преобразования способствовали значительному усилению промывного режима течений на створе ворот Морского канала и в результате образованию эрозионной депрессии, которая к 1904г уже имела четкие контуры с глубинами 12-14м (рис 5) [10]. Депрессия на входе в канал является типичным морфометрическим образованием возникающим при взаимодействии вдольберегового потока и выдвинутых в море гидротехнических сооружений [10].



**Рисунок 5 Балтийский пролив на карте 1903г [10].**

После реконструкции и удлинения защитных гидросооружений севернее молов начался мощный процесс аккумуляции наносов по принципу входящего угла (рис 4) и на сегодняшний день берег в этом районе представлен пятиметровой авандюной плавно переходящей в широкий песчаный пляж (до 50м). Южнее молов активизировался процесс интенсивной абразии, в результате береговая черта северной конечности Вислинской косы ежегодно отступает со скоростью от 3м до 5.5м/год [5] (рис 6).

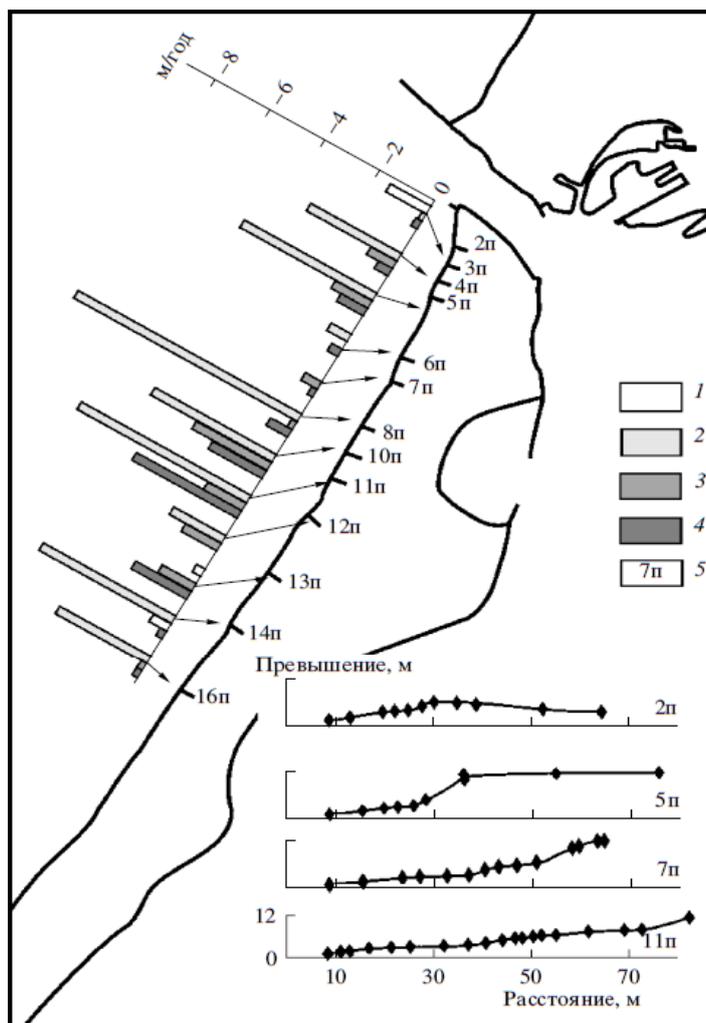


Рисунок 6 Межгодовые вариации скорости миграции береговой черты. 1 – 2000-2001; 2 – 2001-2002; 3 – 2002-2003; 4- 2003-2004гг.; 5 – номер профиля [5].

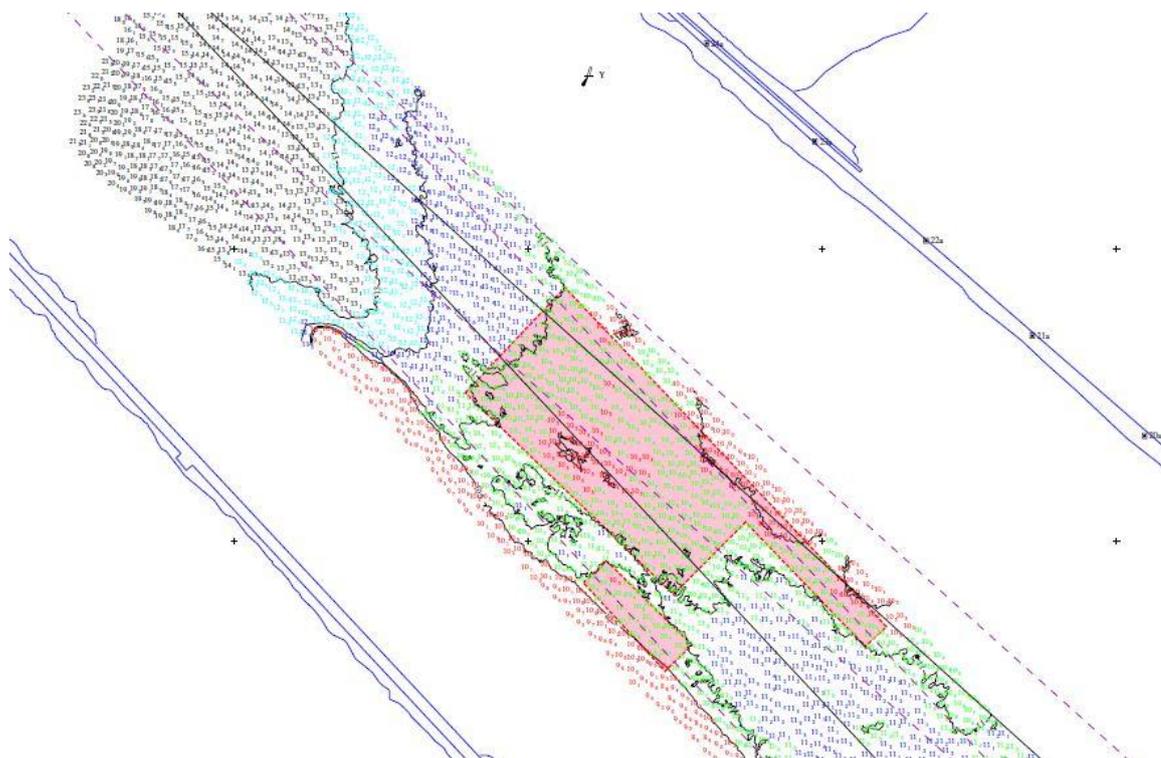
## **2. АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИИ В КАЛИНИНГРАДСКОМ МОРСКОМ КАНАЛЕ ПО ДАННЫМ ЕЖЕГОДНЫХ ПРОМЕРОВ ГЛУБИН**

С момента возведения оградительных молов эрозионная депрессия на входе в Морской канал увеличивает свои размеры, однозначно, она возникла при взаимодействии выдвинутых в море гидротехнических сооружений и вдольберегового потока Гданьского залива, поэтому анализ многолетней динамики морфометрии депрессии может указать на преобладающее направление транзита донных наносов в районе исследования [10].

### **2.1 Исходные данные**

Данные о промерах были предоставлены службой контроля морских глубин Калининградского морского канала, в виде планшетов с охватом абразионной депрессии и технических заданий (ПК 27а-1а) на дноуглубительные работы за 2008-2016гг. Наибольший охват по площади района исследования имеют промеры, выполненные в 2011г и 2012г до изобаты 18м. Практически все промеры выполнялись весной (апрель-май), за исключением 2009 и 2015гг, когда работы проводились летом (июнь и август). На всех полученных изображениях глубины в метрах приведены к единому многолетнему уровню Балтийского моря [16].

Из полученных технических заданий службы Калининградского Морского канала за 2008г-2016г установлено, что в Балтийском проливе идет процесс регулярного образования песчаных отмелей в конце пролива, в центре и на входе, сразу за придонной промоиной между молами ПК-21а-24а. Разборка последней отмели (рис 7) приводится практически во всех заданиях на дноуглубительные работы (табл 2), за исключением 2012 и 2016гг. Также можно заметить, что объемы дноуглубительных работ в целом, с каждым годом увеличиваются.



**Рисунок 7 фрагмент области ПК 27-21 из технического задания с отмеченной областью дноуглубительных работ в 2008 г [16].**

**Таблица 2 Объем дноуглубительных работ на участке Морского канала в 2008-2016 гг [16].**

№пп	Год	Период работ	Участок работ	Объем, м3	Примечание
	2008	август	Пк 23а-20а	7100	
		ноябрь	Пк 23а-10а	2050	
	2009	июль	Пк 23а-9а	12540	
		октябрь	Пк 23а-9а	8800	
	2010	октябрь	Пк 24а-10а	15130	
	2011	сентябрь	Пк 24а-12а	15430	
	2012	август	Пк 19а-3	63550	
	2013	июль	Пк 23а-10а	26760	
	2014	ноябрь	Пк 24а-10а	17200	
	2015	октябрь	Пк 23а-10а	28980	
	2016	март	Пк 10а-0	45000	

Оцифровка данных промеров выполнялась с использованием программного обеспечения НУРАСК. Выбирались только те данные, которые охватывают депрессию до проектной глубины канала (10.5м).

Построения батиметрических карт придонной депрессии выполнялось с использованием программного комплекса ArcGis. На основе оцифрованных

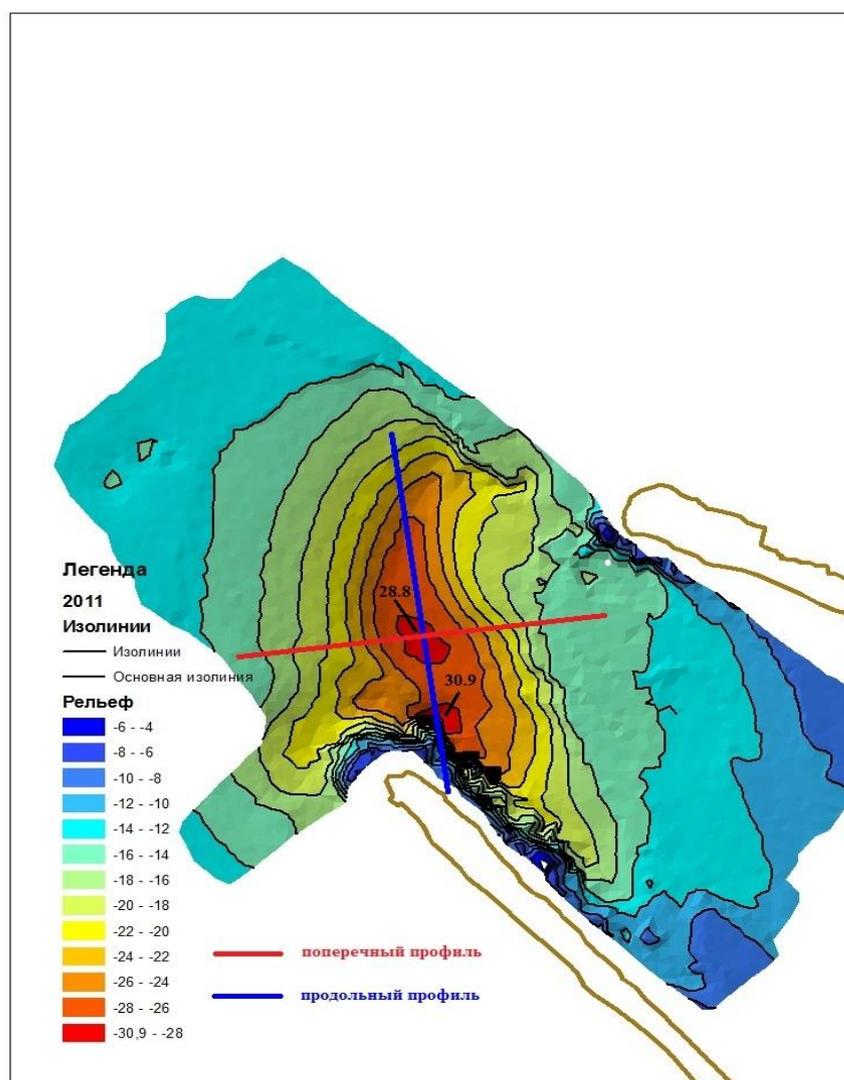
данных созданы нерегулярные триангуляционные поверхности (Triangular Irregular Networks - TIN), интерполяция выполнялась методом Делоне, максимальная длина граней треугольников 30м [18].

На полученных изображениях, с 2010г отмечается изменение основания головки южного мола, что может быть связано с проседанием уложенных в 2006г тетрадных блоков при реконструкции южного мола [4].

## **2.2 Результаты анализа динамики морфометрии**

Батиметрические карты эрозионной депрессии по данным промеров за 2008-2016гг представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А на рисунках 1-9. Совмещенные контуры вершин (по изобате 28 м) за 2008-2016гг представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А на рисунках 10-17. Совмещенные контуры изобаты 20м представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А на рисунках 18-24. Продольные и поперечные профили депрессии за 2008-2016гг представлены в ПРИЛОЖЕНИИ В на рисунках 1-19. Облака пиковых точек примоловой и центральной вершин представлены на рисунке 11. Вектора перемещения пиковых точек изображены на рисунках 12-13, графики динамики пиков на рисунках 14-15.

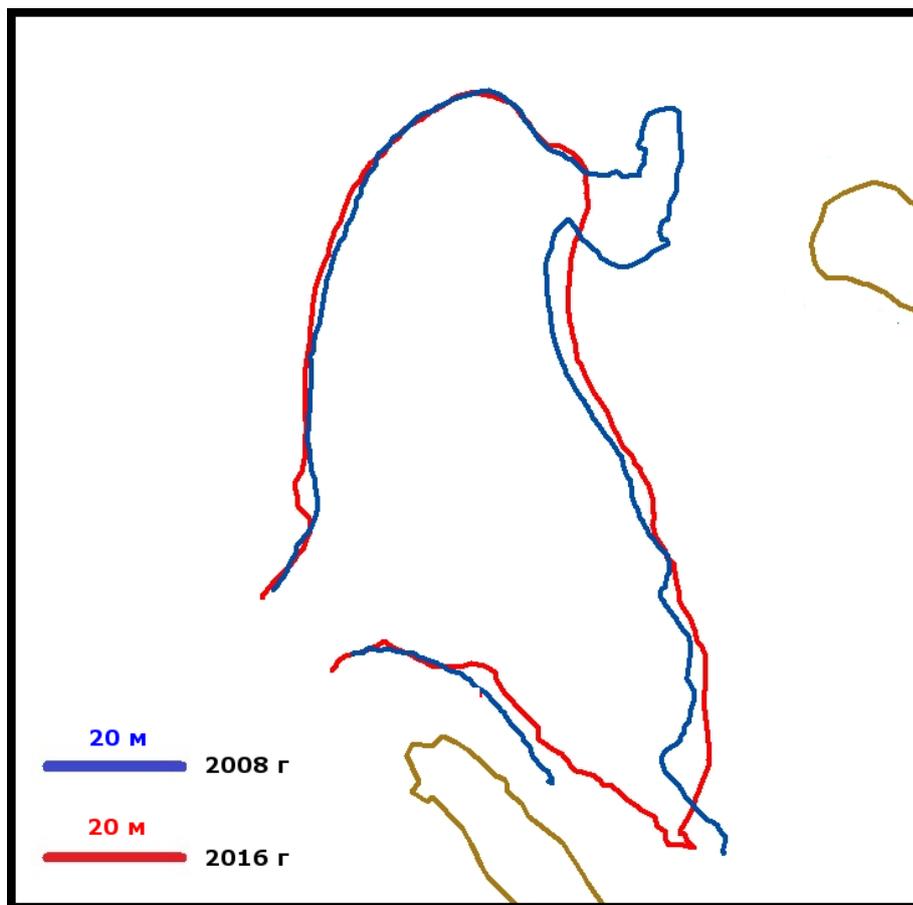
Из анализа построенных карт видно, что депрессия (рис 8) имеет эллипсовидную форму, пересекает фарватер в северо-восточном направлении примерно параллельно берегу и примыкает к голове южного мола, частично огибая его с западной стороны. На «теле» депрессии выделяются две вершины, центральная и примоловая с максимальными пиками до 31м (рис 8).



**Рисунок 8** Изолинии глубин по данным промера за 2011г с отмеченными трассами профилей и максимальными глубинами обеих вершин.

Следует отметить, что в период с 2008 по 2016 г депрессия практически не меняет своих очертаний [ПРИЛОЖЕНИЕ А рис 1-9] за исключением очертаний, так называемых «языков охвата» придонными наносами южного и северного мола [ПРИЛОЖЕНИЕ А, рис 18-24]. «Язык охвата» северного мола с 2008 по 2016гг равномерно сглаживается и депрессия с северной стороны к 2016г приобретает правильные очертания эрозионной формы (рис 9). Язык охвата южного мола на большинстве полученных изображений недостаточно покрыт данными промеров с 2008 по 2010гг [ПРИЛОЖЕНИЕ А рис 1-3] и с 2013 по 2016гг [ПРИЛОЖЕНИЕ А

рис 6-9], поэтому выполнить анализ изменения очертаний этой области не представляется возможным.



**Рисунок 9 Совмещенные контуры придонной депрессии по изобате 20м за 2008 и 2016гг.**

В 2008г депрессия имеет две вершины - центральную и примоловую. К 2009г обе вершины начали сливаться в одну центральную [приложение А рис 10]. В 2010г происходит изменение очертаний основания головки южного мола, что связано с проседанием хаотично уложенных тетраэдных блоков при реконструкции защитных сооружений в 2006г [4]. В 2010г примоловая вершина вплотную примкнула к основанию сооружения [приложение А рис 11]. В 2011 - 2013гг значительно уменьшилась площадь охвата обеих вершин [приложение А рис 12-13]. В 2014г площадь центральной вершины увеличилась в разы, а примоловая вершина сместилась вглубь канала [приложение А рис 15]. С 2015 по 2016 г на изображениях присутствует только одна центральная вершина, вытянутая с севера на юг. При этом, площадь охвата значительно увеличилась, примоловая вершина исчезла

[приложение А рис 16-17]. Продольные профили представлены в ПРИЛОЖЕНИИ В на рисунках 2-10, поперечные профили в ПРИЛОЖЕНИИ В на рисунках 11-19.

С 2008 по 2016г обе вершины значительно увеличили свою площадь и слились в одну центральную вершину (рис 10).

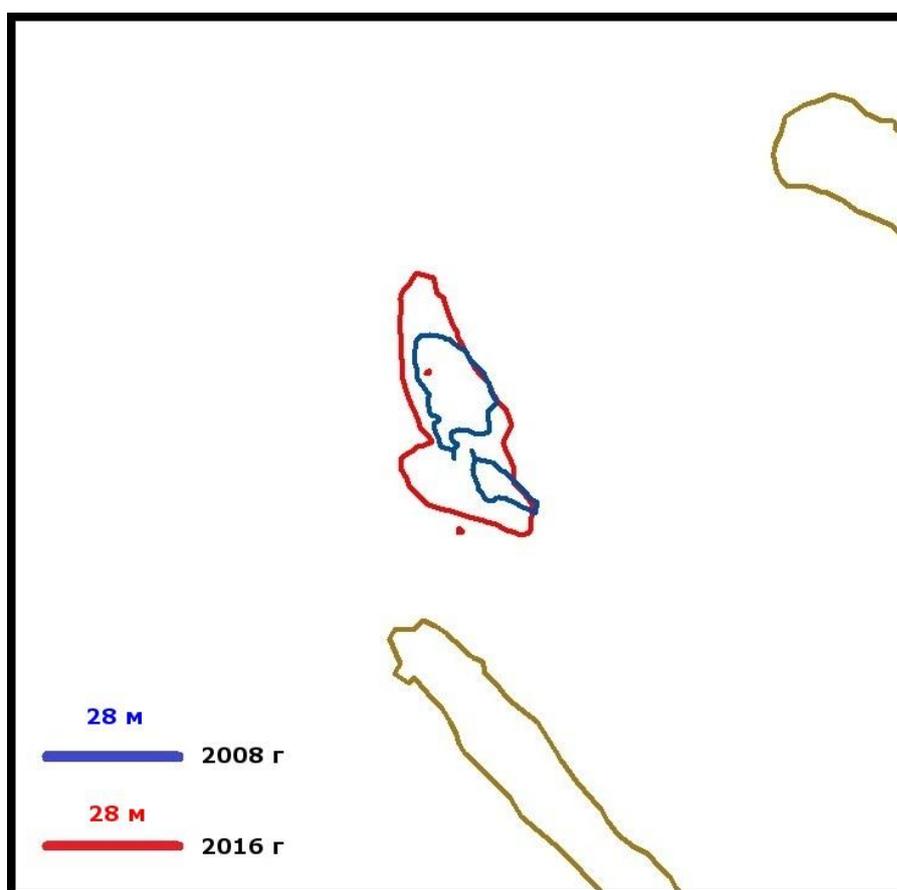
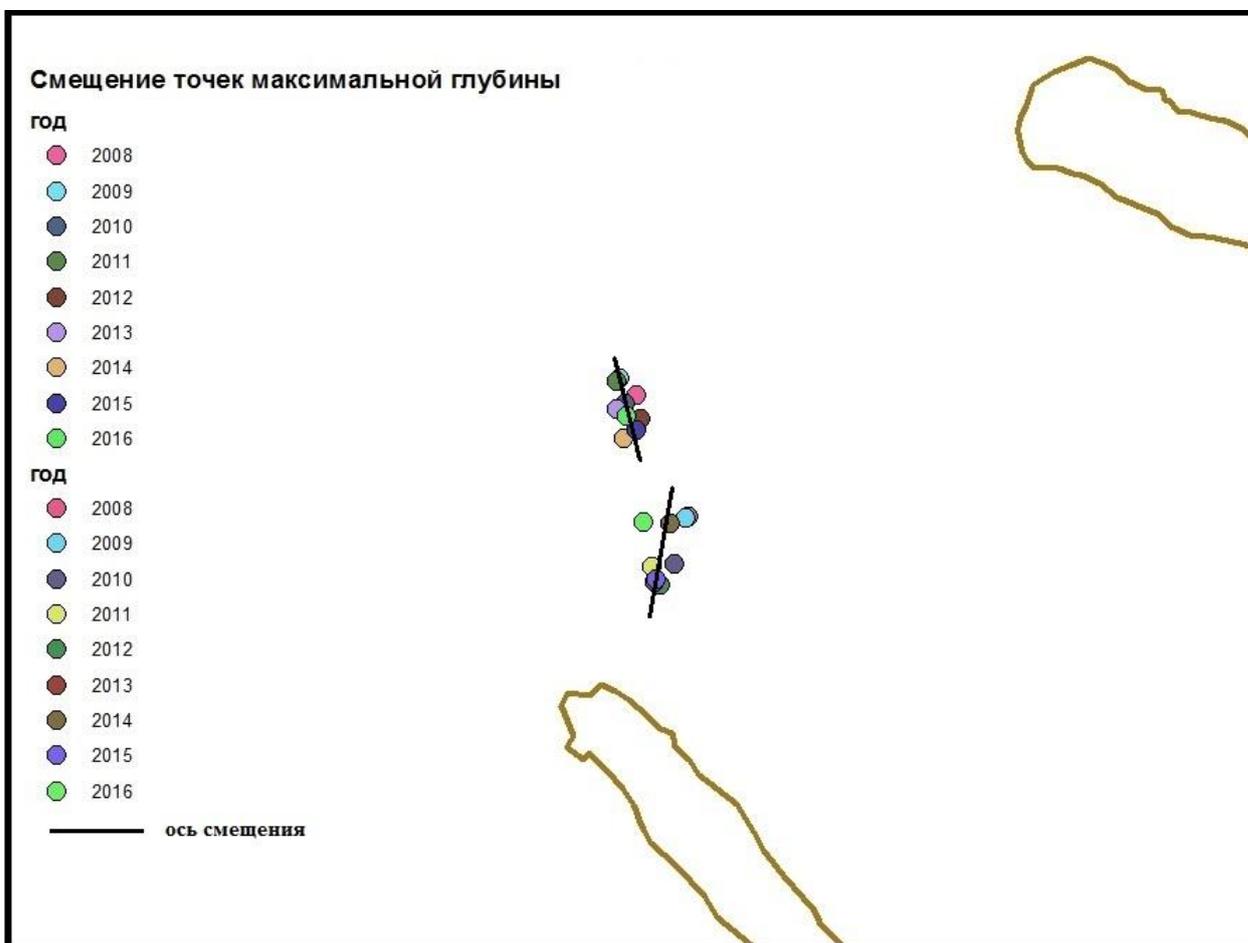


Рисунок 10 изменение контуров вершин депрессии по изобатам 28м с 2008 по 2016г

Облако точек центральной вершины вытянуто с севера на юг. Облако точек примоловой вершины вытянуто с северо-востока на юго-запад (рис 11). Наибольший разброс имеют точки примоловой вершины, в высоту облака точек обеих вершин вытянуты примерно одинаково около 30 м. Движение точек обеих вершин имеет нерегулярный и несинхронный характер (рис 12-13).

Минимальная отметка пика центральной вершины зафиксирована в 2011г и составила 28.4м, максимальная в 2014г - 28.9м (рис 14). Минимальная отметка 28.2м примоловой вершины в 2012г, максимальная

30.9м в 2011г. Изменение пиков обеих вершин депрессии с 2008г по 2016г происходит хаотично, при этом максимальная глубина как у примоловой вершины, так и центральной с постепенно увеличивается (рис 14-15).



**Рисунок 11 Пиковые точки центральной и примоловой вершин депрессии по данным промеров 2008-2016гг.**

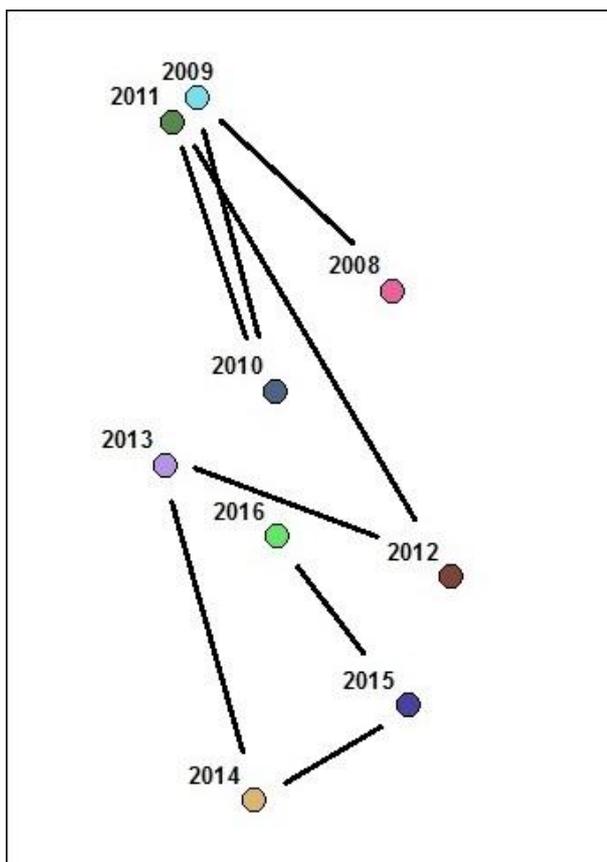


Рисунок 12 Вектора передвижения точек центральной вершины депрессии за 2008-2016гг.

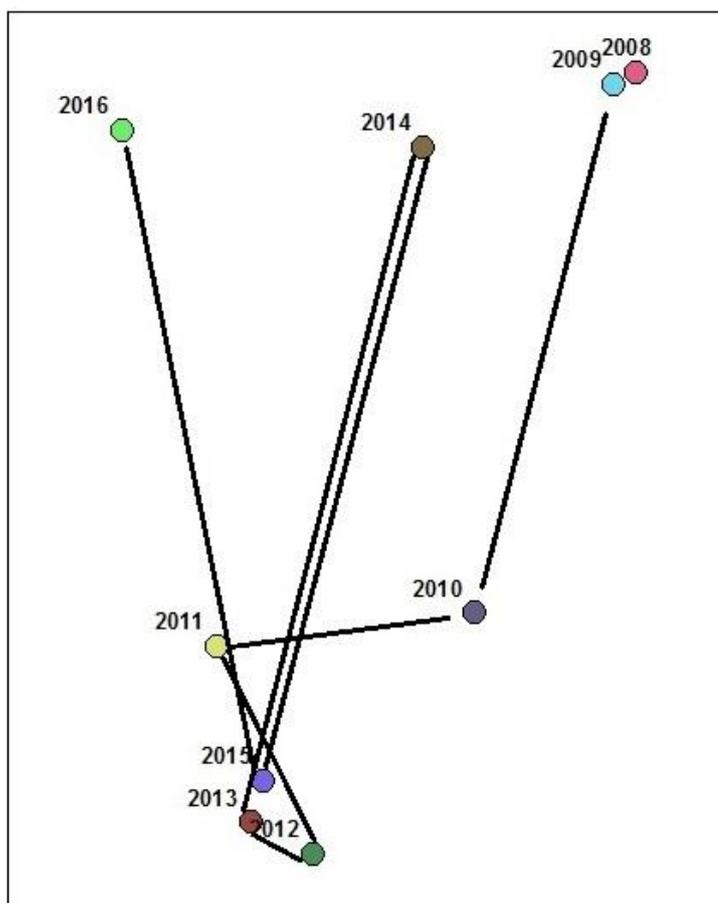


Рисунок 13 вектора передвижения точек примоловой вершины депрессии за 2008-2016гг.



Рисунок 14 динамика максимальной глубины центральной вершины депрессии 2008-2016гг



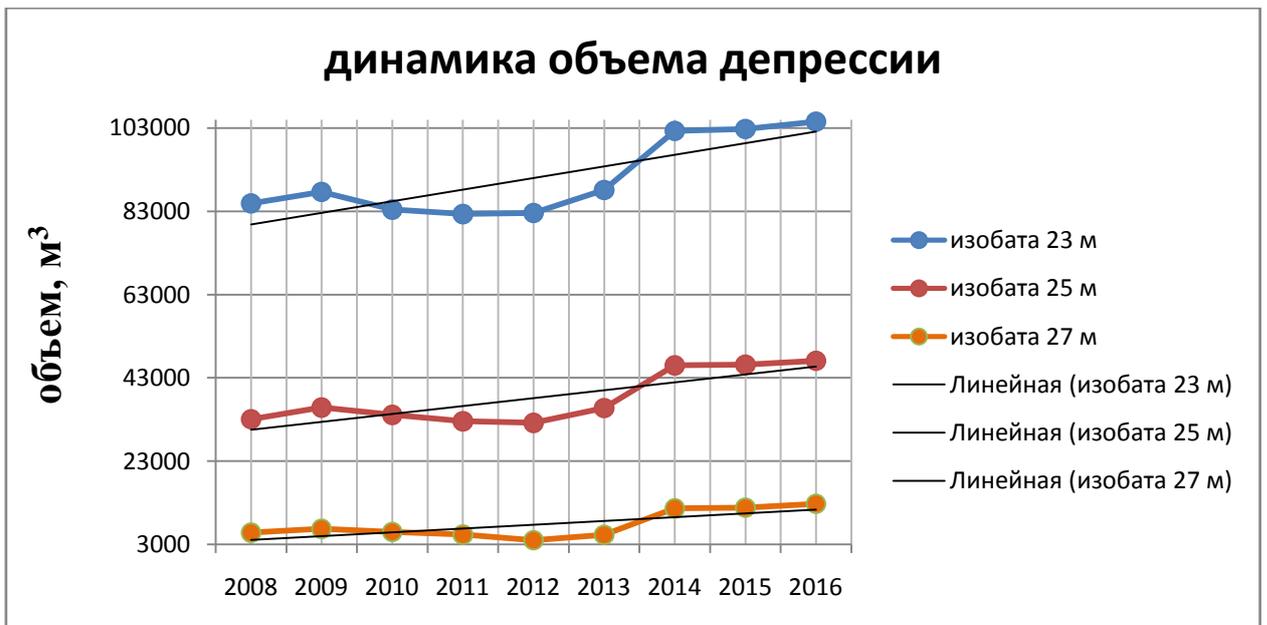
Рисунок 15 Динамика максимальной глубины примоловой вершины депрессии 2008-2016гг.

Трасса продольного профиля проведена по линии пересечения центральной и примоловой вершин эрозионной депрессии по направлению с севера на юг, трасса поперечного профиля проходит через центральную вершину с запада на восток (рис 8).

Длина продольных профилей достигает 360м, высота 15м, левый склон пологий, правый склон указывает на положение стенки южного мола. В 2009г происходит подмыв стенки южного мола, основание которой в 2010 г значительно сместилось влево. Данное изменение связано с проседанием хаотично уложенных тетрадных блоков к основанию сооружения [ПРИЛОЖЕНИЕ В, рис. 2-4]. С изменением положения стенки после 2010г происходит начался активный процесс эрозии у основания южного мола, в 2011г максимальная глубина примоловой вершины достигла 30.9м [ПРИЛОЖЕНИЕ В, рис. 5]. С 2011г по 2016г зафиксирован рост глубин в районе примоловой вершины [ПРИЛОЖЕНИЕ В, рис. 2-10].

Длина поперечных профилей составляет 160м, высота - 10м, левый склон на всех графиках пологий, а правый крутой. С 2008 по 2012гг на поперечных склонах значительных изменений не наблюдалось, по ширине депрессия условно стабильна, за исключением роста глубины в районе центральной вершины с 2013 по 2016 гг. [ПРИЛОЖЕНИЕ В, рис 11-19].

Объема депрессии, рассчитанный по изобатам 23м, 25м, 27м представлена на рисунке 16. Все три графика указывают на схожую динамику (рис 16). До 2009г идет процесс активного увеличения объема депрессии, с 2010г по 2012г наблюдается уменьшение объема, что связано с проседанием основания южного мола и обмеления южной вершины. С 2013 по 2014 г происходит резкое увеличение объема, что хорошо видно на рисунке 16. К 2016г скорость увеличения объема депрессии приблизились к значениям 2008-2009гг (рис 16).



**Рисунок 16** Динамика изменения объема депрессии по изобатам 23м, 25м, 27м за 2008-2016гг

Анализ многолетней динамики морфометрии депрессии расположенной на входе в Калининградский морской канал показал, что в период с 2008 по 2016г депрессия, в целом, не изменила своих очертаний, за исключением сглаживания «языка наносов» у основания северного мола. Центральная и примоловая вершины к 2016г слились в одну, а максимальная глубина с каждым годом увеличивается. Зафиксированное проседание в 2009г защитной укладки в виде присыпки тетраэдных блоков у основания головки южного мола вызвало резкое изменение в ходе процесса эрозии, о чем свидетельствует резкое увеличение объема депрессии в период с 2010г по 2014г (рис16). Видимо, после реконструкции молв в 2006г [4] происходил интенсивный подмыв основания южного мола вдольбереговыми течениями, что привело к проседанию присыпки южного мола и стало причиной резкого скачка максимально глубины примоловой вершины в 2011г. С момента реконструкции депрессия не достигла состояния равновесия, очертания контуров практически не изменяются, а объем и максимальная глубина с каждым годом увеличиваются.

Результаты анализа данных наблюдений показали, что основные изменения очертаний и глубины депрессии происходит у оголовка южного

мола, что является достаточным аргументом в пользу заключения о результирующем транспорте донных наносов направленного с севера на юг, что соответствует [15], но противоречит [10].

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ДНА

В данной главе представлены результаты расчета течений, уровня, ветрового волнения и деформации дна в Балтийском проливе и прилегающей акватории восточной части Гданьского залива при постоянном действии 5% обеспеченности скорости ветра западного и северного направлений [8]. Штормовые ветра данных направлений формируют вдольбереговой поток наносов в Гданьском заливе от устья реки Висла до мыса Таран направленный с юга на север или с севера на юг в зависимости от направления ветра, под влиянием этого потока находится все восточное побережье залива, особенно сильно этому влиянию подвержен район Балтийского пролива, на входе в который с начала XX века присутствует эрозионная депрессия [10]. Математическое моделирование деформации дна в районе исследования может указать на изменение хода динамики морфометрии депрессии при различных сценариях постоянного действия экстремальных штормовых ветров северного и западного направлений.

Расчеты выполнялись в двухмерной постановке по трем моделям: 1) модель Балтийского моря BSM-2010 2) локальная модель Гданьского залива и 3) локальная модель Балтийского пролива.

При расчетах по модели BSM-2010 записывался временной ход расходов воды на разрезах, соответствующих участкам открытых границ локальной модели Гданьского залива. Эти данные экспортировались после окончания расчетов в локальную модель и использовались как граничные условия на открытых границах. Данный метод применялся и к локальной модели Балтийского моря.

Модели были созданы с помощью программного комплекса (ПК) CARDINAL (<http://cardinal-hydrosoft.com>) [8,9]

Для расчета волнения использовался программный комплекс SWAN – модель ветрового волнения [13] (версия 40.91AB, 2016), разработанная в

Дельфтском технологическом университете (DelftUniversityofTechnology, FacultyofCivilEngineeringandGeosciences). Расчеты по SWAN выполнялись для момента окончания расчета сначала по модели BSM-2010, затем уточнялись по модели Гданьского залива, затем по локальной модели Балтийского пролива.

Расчеты деформации дна выполнялись с использованием метода Л.ВанРайна (LeoVanRijn) из фирмы DelftHydraulics, Нидерланды.

### 3.1 Исходные уравнения.

Расчеты выполнялись в двумерной постановке по уравнениям мелкой воды (1.1 - 1.2) [8]. Значения величин размывов и аккумуляции частиц грунта определялись из уравнения (1.3), в котором для расчета транспорта донных наносов использовался метод Ван Райна (L. VanRijn), формулы 1.3 – 1.11. Основные уравнения модели представлены в следующем виде [8]:

$$\vec{U}_t + (\vec{U} \cdot \nabla) \frac{\vec{U}}{H} = -gH\nabla\zeta - \frac{H}{\rho_0} \nabla P_a + \vec{f} \times \vec{U} + K\Delta\vec{U} + C_D \vec{W} |\vec{W}| - \frac{f_b \vec{U} |\vec{U}|}{H^2} \quad (1.1)$$

$$\zeta_t + \text{div} \vec{U} = 0. \quad (1.2)$$

$$h_t = -\frac{\rho_p}{\rho_s} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (1.3)$$

$$q = q_b + q_s \quad (1.4)$$

$$q_b = 0.015uh \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} (Me)^{1.5}, \quad (1.5)$$

$$q_s = 0.012ud_{50} (Me)^{2.4} (D_*)^{-0.6} \quad (1.6)$$

$$Me = \frac{u_e - u_{cr}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (1.7)$$

$$D_* = d_{50} \left[ (s-1) \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (1.8)$$

$$s = \frac{\rho_p}{\rho_0} \quad (1.9)$$

$$u_e = u + \psi u_w \quad (1.10)$$

$$u_{cr} = \begin{cases} 0.19(d_{50})^{0.1} \log \frac{12h}{3d_{90}} & 0.0001 < d_{50} < 0.0005 \\ 8.5(d_{50})^{0.6} \log \frac{12h}{3d_{90}} & 0.0005 < d_{50} < 0.002 \end{cases} \quad (1.11)$$

где  $\vec{U}$  – вектор удельного расхода воды (полный поток),  $H = \eta + \zeta$  – толщина слоя воды,  $h$  – глубина воды от нулевого уровня, отсчитывается вертикально вниз,  $\zeta$  – уровень свободной поверхности, отсчитывается от нулевого уровня вертикально вверх,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_0$  – плотность воды,  $P_a$  – атмосферное давление,  $f$  – параметр Кориолиса,  $K$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена,  $\vec{W}$  – скорость ветра на высоте 10 м,  $C_D$  – ветровой коэффициент,  $f_b$  – коэффициент придонного трения,  $\rho_p$  – плотность частиц в донных отложениях,  $\rho_s$  – плотность донных отложений,  $q_x$  и  $q_y$  – компоненты вектора расхода наносов  $q$  (м<sup>3</sup>/(м.с)),  $q_b$  и  $q_s$  – расход влекаемых наносов и расход взвешенных наносов, соответственно,  $u$  – средняя по глубине скорость потока,  $\nu$  – кинематическая молекулярная вязкость воды,  $u_w$  – максимальная придонная орбитальная волновая скорость значимой волны,  $\psi = 0.4$  для нерегулярных волн и  $\psi = 0.8$  – для регулярных (использовалось значение  $\psi = 0.4$ ),  $d_{50}$  – средний диаметр частиц

грунта,  $d_{90}$  – диаметр частиц грунта 90% обеспеченности (90% объема грунта имеют размер меньше  $d_{90}$ ). Все дано в системе СИ.

Представленные уравнения преобразовывались к криволинейным неортогональным координатам и к контравариантным составляющим скорости и решались полунявным методом конечных разностей на криволинейной гранично-зависимой C-сетке Аракавы (рис 17). Узлы для расчета уровня находятся внутри сетки, граница области проходит по граням, на которых заданы составляющие удельных расходов. Для построения сетки используется эллиптический метод Томпсона [8].

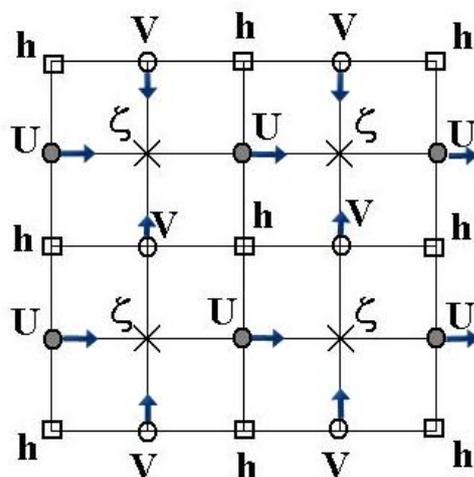


Рисунок 17 Расположение расчетных переменных на разнесенной C-сетке Аракавы [8]

### 3.2 Описание модели Балтийского моря BSM-2010

Сетка модели Балтийского моря состоит из 300321 узла (681 x 441) и охватывает область площадью 387607 км<sup>2</sup> с объемом воды 20891 км<sup>3</sup>. Береговая линия задавалась по данным снимков NOAA. Поле глубин строилось на основе данных навигационных карт стран региона Балтийского моря. Средний шаг между уровнями точками – 3,6 км, максимальный 19,1 км, минимальный – 110 м. Модель Балтийского моря BSM-2010 используется с 1999 г. в оперативном режиме в ФГБУ «Северо-Западное УГМС» для прогноза наводнений в С.-Петербурге, а также для управления Комплексом сооружений защиты С.-Петербурга от наводнений [8].

Поле глубин для всей расчетной области и района Гданьского и Вислинского залива представлено на рисунке 18, фрагмент расчетной сетки в районе исследования представлен на рисунке 19.

При расчете динамики учитывалась адвекция, а на твердых границах задавалось условие прилипания к берегу, шаг по времени 30 сек, счет с начального уровня воды 1.5м. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена задавался пропорциональным площади ячейки сетки (S) по закону «4/3»:  $K = \gamma(\Delta S)^{4/3}$  Коэффициент  $\gamma$  задавался равным 0.3

Диаметр частиц грунта задавался от 0.5мм до 1мм, плотность грунта 1.8 г/см<sup>3</sup>, высота гряд 0.4м, шероховатость дна 0.001411. Придонная орбитальная скорость  $u_w$  рассчитывалась по программе SWAN (модель ветрового волнения). Во время счета производилась запись временного хода расходов на участках открытых границ локальной модели Гданьского залива.

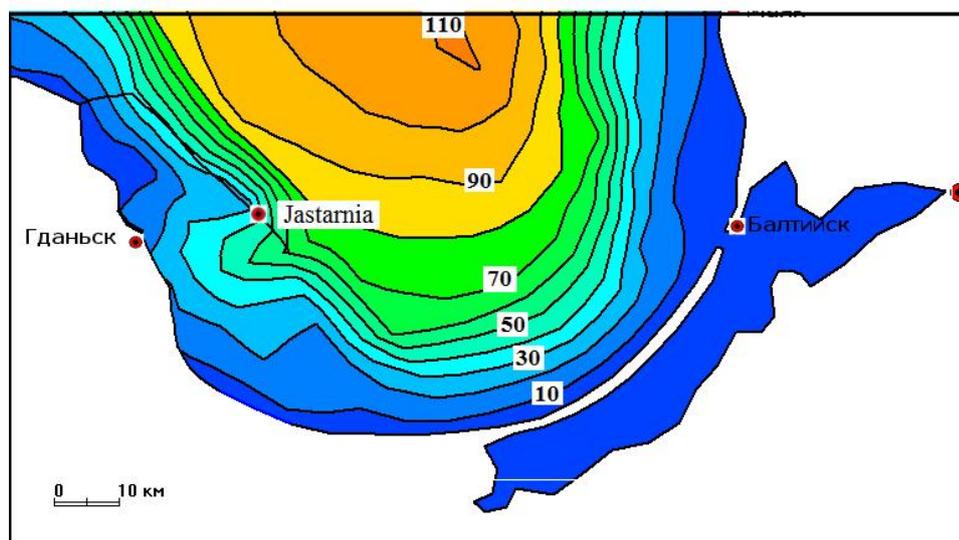
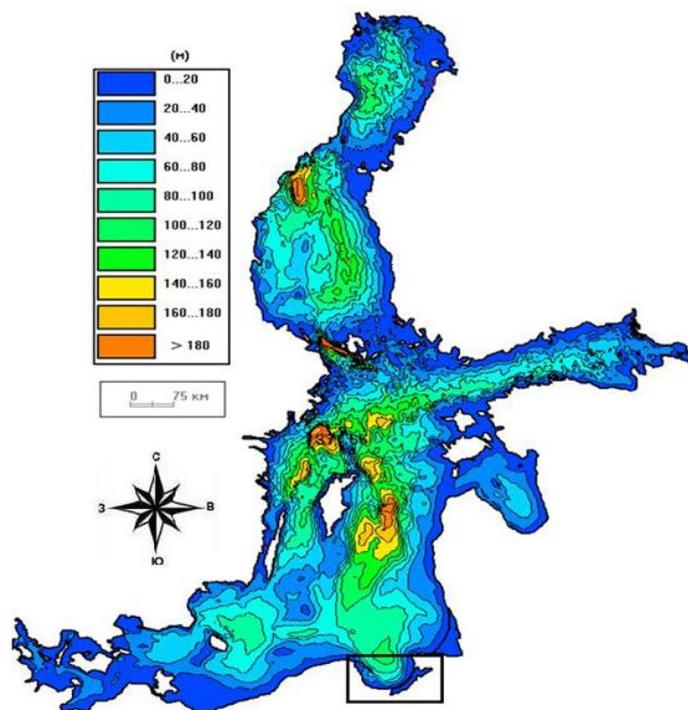
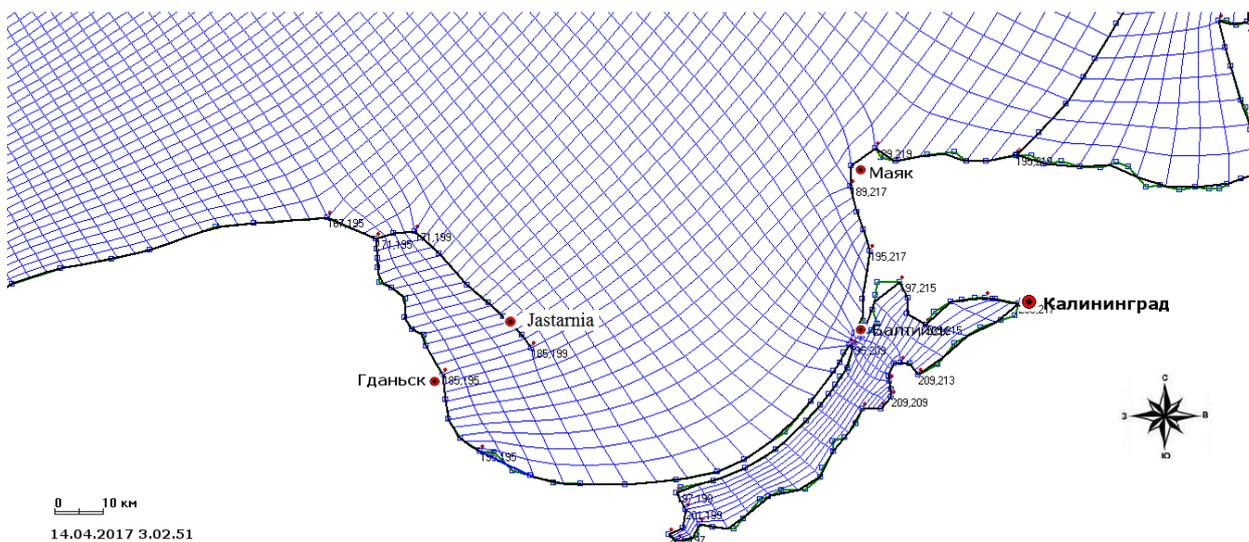


Рисунок 18 Поле глубин (м), модель Балтийского моря BSM -2010. Внизу – фрагмент для района Гданьского и Вислинского заливов



**Рисунок 19 Расчетная сетка модель Балтийского моря BSM -2010**

### **3.3. Локальная модель Гданьского залива**

Локальная модель Гданьского залива создавалась на основе модели Балтийского моря BSM-2010. Открытая граница области проходит от Гданьска до мыса таран по контуру вогнутой параллели сетки модели BSM-2010. Расчетная сетка локальной модели Гданьского залива состоит из 15471 узла из которых на акваторию приходится 13883 расчетных узла. Фрагмент расчетной сетки показан на рисунке 21. Средний шаг между уровнями точками - 552.64 м, минимальный – 12.14 м. Площадь акватории – 892.81 км<sup>2</sup>, объем воды 39.54 км<sup>3</sup>. Поле глубин представлено на рисунке 20, значения глубин задавали по данным навигационных карт.

При счете динамики учитывалась адвекция, а на твердых границах задавалось условие прилипания к берегу, шаг по времени 8 сек, счет с начального уровня воды 0.5м. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена задавался пропорциональным площади ячейки сетки (S) по закону «4/3»:  $K = \gamma(\Delta S)^{4/3}$ . Коэффициент  $\gamma$  задавался равным 0.5

Диаметр частиц грунта от 0.5мм до 1мм, плотность грунта 1.8 г/см<sup>3</sup>, высота гряд 0.4м, шероховатость дна 0.00141. Придонная орбитальная скорость  $u_w$  рассчитывалась в модели ветрового волнения SWAN(в стационарной моде).

Во время счета производилась запись временного хода расходов на участках открытых границ локальной модели Балтийского пролива.

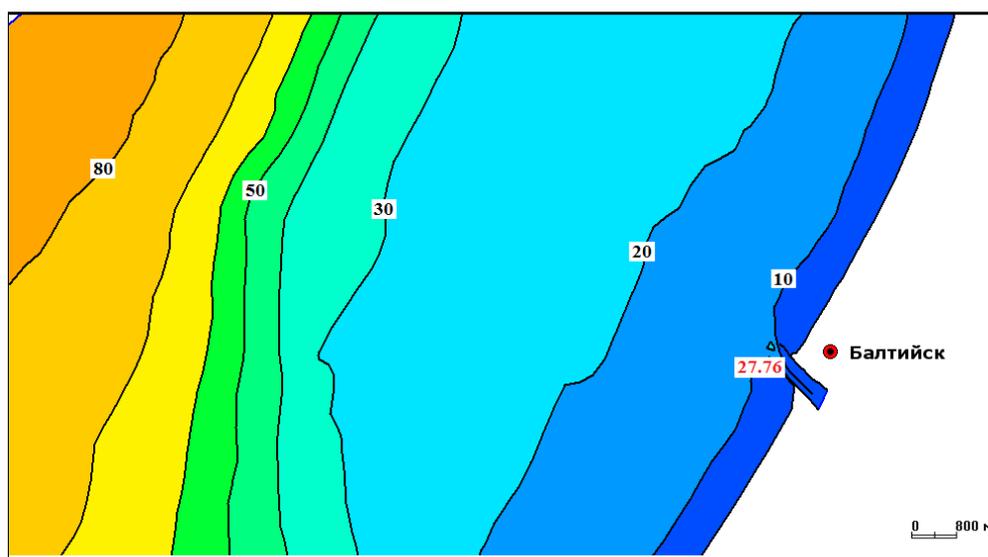
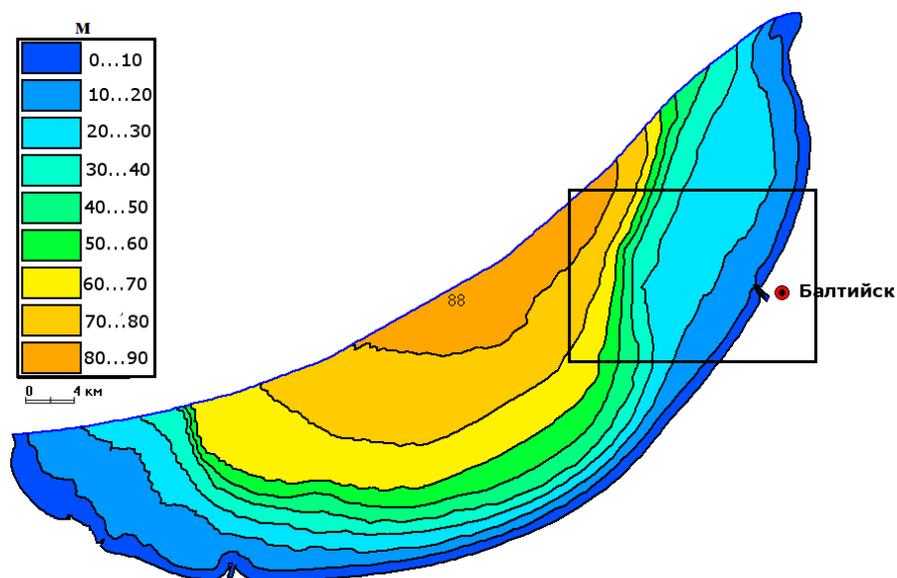
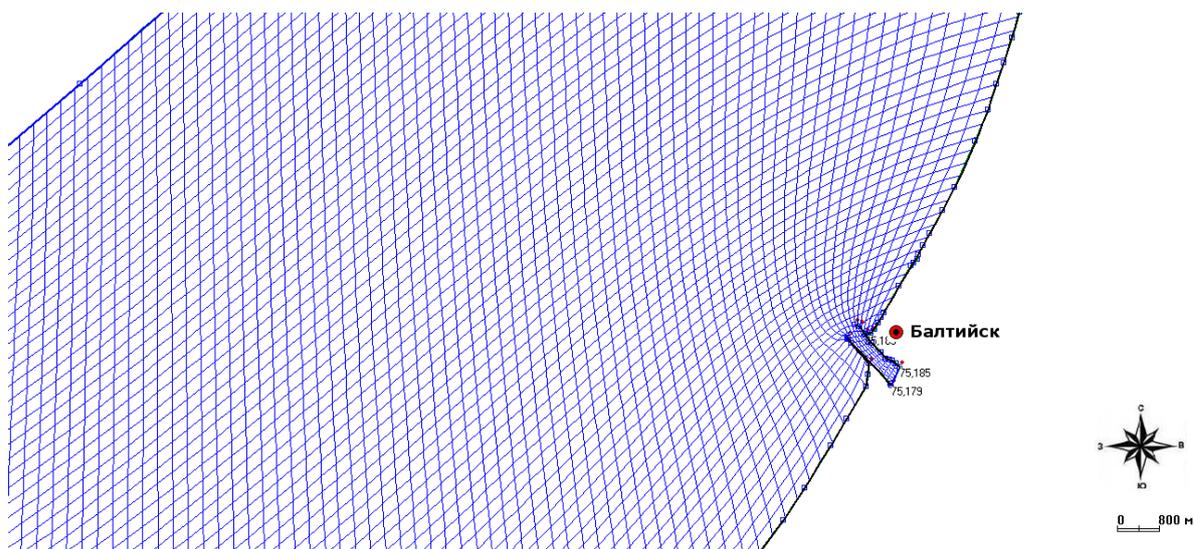


Рисунок 20 Поле глубин (м), локальной модель Гданьского залива. Внизу - увеличенный фрагмент поля глубин для района Балтийского пролива



**Рисунок 21** Фрагмент расчетной сетки локальной модели Гданьского залива в районе Балтийского пролива.

### 3.4 Локальная модель Балтийского пролива

Локальная модель Балтийского пролива создавалась на основе локальной модели Гданьского залива. Открытая граница области проходит по контуру сетки локальной модели Гданьского залива. Расчетная сетка состоит из 26537 расчетных узлов, из которых на акваторию приходится 20950 узлов. Площадь акватории 20.82км<sup>2</sup>, объем воды 0266 км<sup>3</sup>. Средний шаг между уровнями точками – 69 м, минимальный – 12 м, максимальный 159 м. Поле глубин представлено на рисунке 22, фрагмент расчетной сетки показан на рисунке 23

При расчете динамики вод учитывалась адвекция, а на твердых границах задавалось условие прилипания к берегу, шаг по времени 8 сек, счет с начального уровня воды 0.6м. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена задавался пропорциональным площади ячейки сетки (S) по закону «4/3»:  $K = \gamma(\Delta S)^{4/3}$ . Коэффициент  $\gamma$  задавался равным 0.5

Диаметр частиц грунта от 0.5мм до 1мм, плотность грунта 1.8 г/см<sup>3</sup>, высота гряд 0.4м, шероховатость дна 0.00141. Придонная орбитальная

скорость  $u_w$  рассчитывалась модели ветрового волнения SWAN(в стационарной моде).

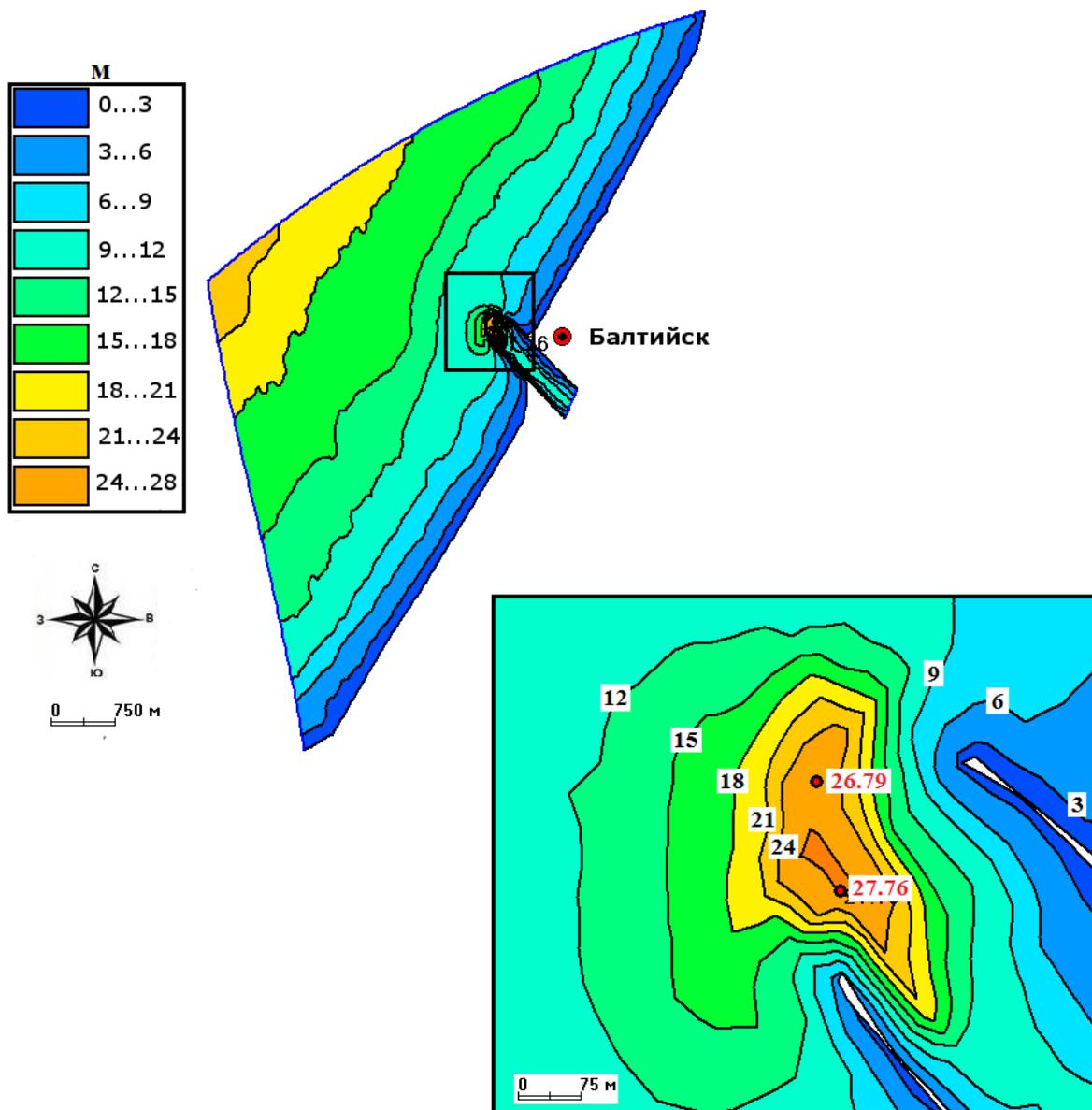
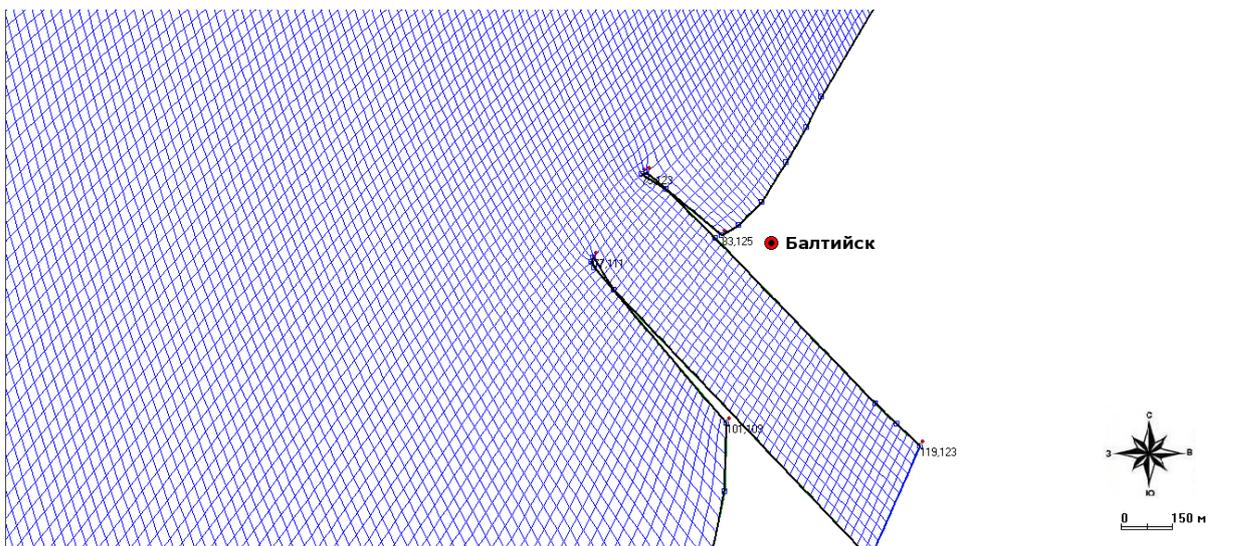


Рисунок 22 Поле глубин (м), локальная модель Балтийского пролива. Внизу - поле глубин в районе придонной эрозии на входе в Морской канал.



**Рисунок 23** Расчетная сетка локальной модели Балтийского пролива в районе исследования.

### **3.5 Анализ результатов**

Модели достаточно адекватно описывает динамику вод в районе исследования, западный и северный ветер формирует вдольбереговой поток направленный с юга на север и наоборот, что не противоречит имеющимся представлениям о картине течений в восточной части Гданьского залива [10]

#### **3.5.1 Результаты расчетов при западном ветре.**

Расчеты выполнялись при постоянном действии ветра западного направления со скоростью 28 м/с [8].

Уровень в юго-восточной части Балтийского моря по BSM-2010 представлен на рисунке 24, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 25, по локальной модели Балтийского пролива на рисунке 26.

В Гданьском заливе перепад уровня направлен по направлению действия ветра и составляет 90 см от западного до восточного побережья залива. В Вислинском заливе в результате нагона уровень возрастает и его перепад составляет 500 см (рис 24). В восточной части Гданьского залива перепад уровня 20 см (рис 25). В Балтийском проливе, от условной черты входных ворот перепад составляет около 4 см. С наветренной стороны

гидротехнических сооружений уровень воды 60см, с подветренной стороны – 64 см (рис 26).

Скорость в Юго-Восточной части Балтийского моря по BMS-2010 представлена на рисунке 27, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 28, по локальной модели Балтийского пролива на рисунке 29.

В Гданьском заливе, вдоль всего побережья с запада на восток сформировалось вдольбереговое течение со средней скоростью около 100 см/сек. В Вислинском заливе, в районе Балтийского пролива вектора скорости разнонаправлены, скорости течений не превышают 20см/сек (рис 27). У восточного побережья Гданьского залива на удалении от берега примерно до изобаты 20 м скорость вдольберегового течения около 60 см/сек, ближе к берегу значения скорости плавно уменьшаются (рис 28). В Балтийском проливе скорость выходящего течения достигает 12 см/сек. Вдольбереговое течение подступает к южному молу с наветренной стороны со скоростью около 30 см/сек, у входных ворот в морской канал происходит наложение векторов скорости огибающего потока и выходящего течения из пролива, и у оголовка северного мола значения скорости достигают 45 см/сек. С подветренной стороны северного мола формируется теневая область со скоростями до 12см/сек (рис 29).

Результаты расчета ветрового волнения при действии постоянного западного ветра 5% обеспеченности представлены на рисунках 30-33.

Высота волн в Юго-Восточной части Балтийского моря по SWAN-BMS-2010 представлена на рисунке 30, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 31, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 32-33.

Максимальная высота волн в Гданьском заливе может достигать 8м, в центре залива высота волн достигает 6м, восточнее и западнее от центра

высота уменьшаются. В Вислинском заливе высота волн до 2м (рис 30). В восточной части Гданьского залива, на расстоянии от берега до изобаты 15м, высоты волн резко сокращается от 5м до 1м (рис 31). В Балтийском проливе от условной черты входных ворот Морского канала высота волн уменьшается от 4 до 1м (рис 32). С наветренной стороны гидротехнических сооружений высота достигает 4м, а с подветренной формируется теневая зона с минимальными значениями (рис 33).

Высоты волн хорошо подчиняются распределению Рэлея [8]. При таком распределении при значимой высоте волн 1 м одна из 10 волн будет выше 1.07 м, одна из 100 выше 1.51 м, а одна из 1000 выше 1.86 м

Длина волн в Юго-Восточной части Балтийского моря по модели волнения SWAN-BSM-2010 представлена на рисунке 34, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 35, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 36-37.

Максимальные значения длин волн в северной части Гданьского залива, к центру акватории длина сокращается до 90м. Воль побережья залива градиент изолиний направлен с запада на восток, достигая максимума в 90м. В Вислинском заливе длина волн до 30 м (рис 34). В восточной части Гданьского залива длина волн от 70м до 50м (рис 35). От условной линии входных ворот вглубь Морского канала длина волн уменьшается от 56м до 8м (рис 36). С подветренной стороны оголовка северного мола присутствует теневая зона со значениями длин волн до 56м, а с наветренной стороны южного мола длина волн от 40м до 64м. (рис 37).

Придонная орбитальная скорость в Юго-Восточной части Балтийского моря по SWAN-BMS-2010 представлена на рисунке 38, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 39, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 40-41.

Градиент придонной орбитальной скорости в Гданьском заливе направлен с запада на восток, от Гданьска до мыса Таран значения скорости лежат в пределах от 15 до 143 см/сек. В Вислинском заливе придонная орбитальная скорость до 45 см/сек (рис 38).

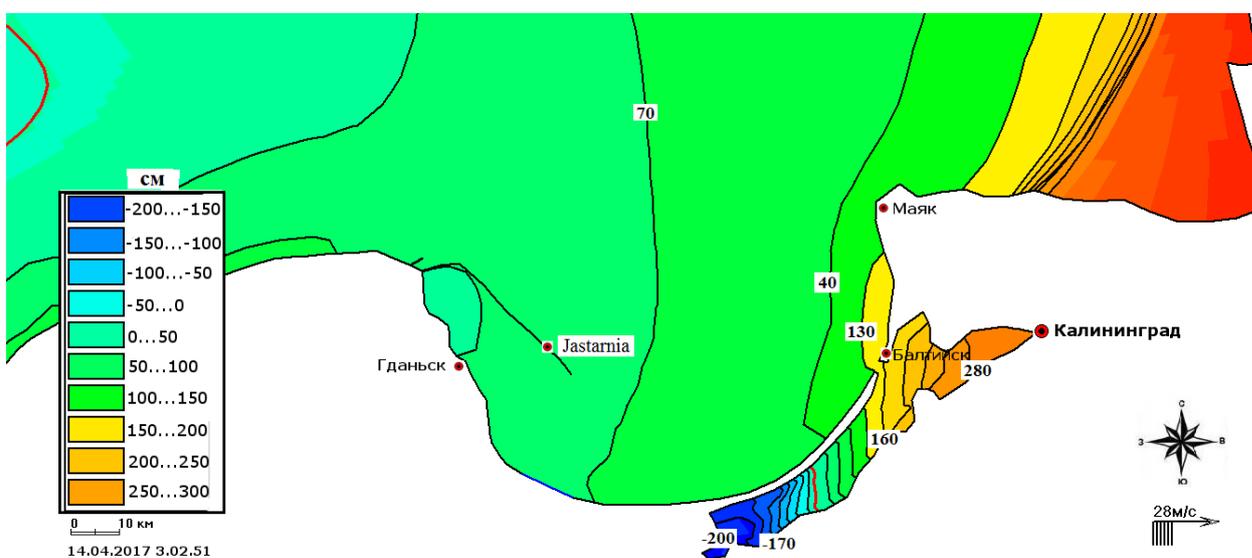
У восточного побережья Гданьского залива значения придонной орбитальной скорости достигают 120 см/сек, с локальными максимумами до 135 см/сек (рис 39). В Балтийском проливе значения скорости до 90 см/сек, на входе в канал изолинии придонной орбитальной скорости со значениями от 36 до 138 см/сек повторяют очертания придонной эрозионной депрессии. (рис 40). С наветренной стороны южного мола придонная орбитальная скорость 126 см/с, а с наветренной стороны северного мола значения скорости достигают своего локального максимума - до 169 см/сек (рис 41). С подветренной стороны сформирована теневая зона со значениями от 15 до 126 см/сек (рис 41).

Результаты расчета деформации дна на 2 суток при постоянном действии западного ветра 5% обеспеченности, рассчитанные по локальной модели Гданьского залива, представлены на рисунках 42-43, по локальной модели Балтийского моря на рисунках 44-45. Желтым цветом обозначены зоны аккумуляции - намыв, зеленым зоны эрозии - размыв.

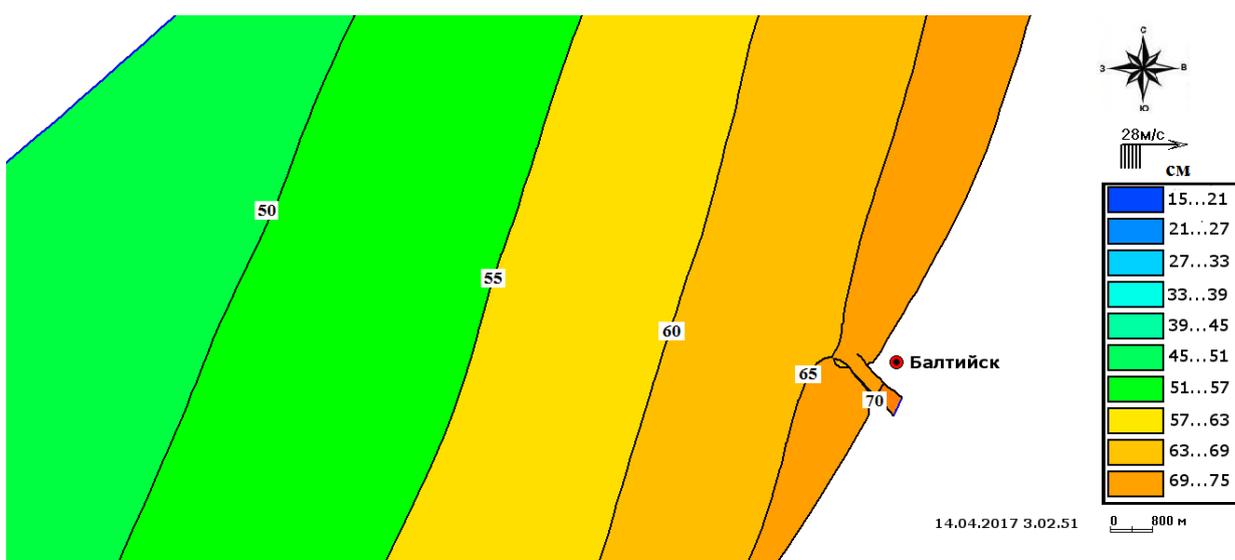
Вдольбереговое течение, со скоростью около 70 см/с направленное с юга на север, у побережья восточной части Гданьского залива сформировало стабильную зону размыва/намыва со средними значениями +/-1 см (рис 42). Процесс аккумуляции до +5 см преобладает с наветренной стороны Балтийского пролива, процесс эрозии преобладает севернее Балтийского пролива от -10 см и с наветренной стороны южного мола -2 см (рис 43).

Максимальные значения размыва и намыва получены в Балтийском проливе при взаимодействии защитных гидротехнических сооружений и вдольберегового течения со скоростью до 60 см/сек. (рис 43). В Балтийском

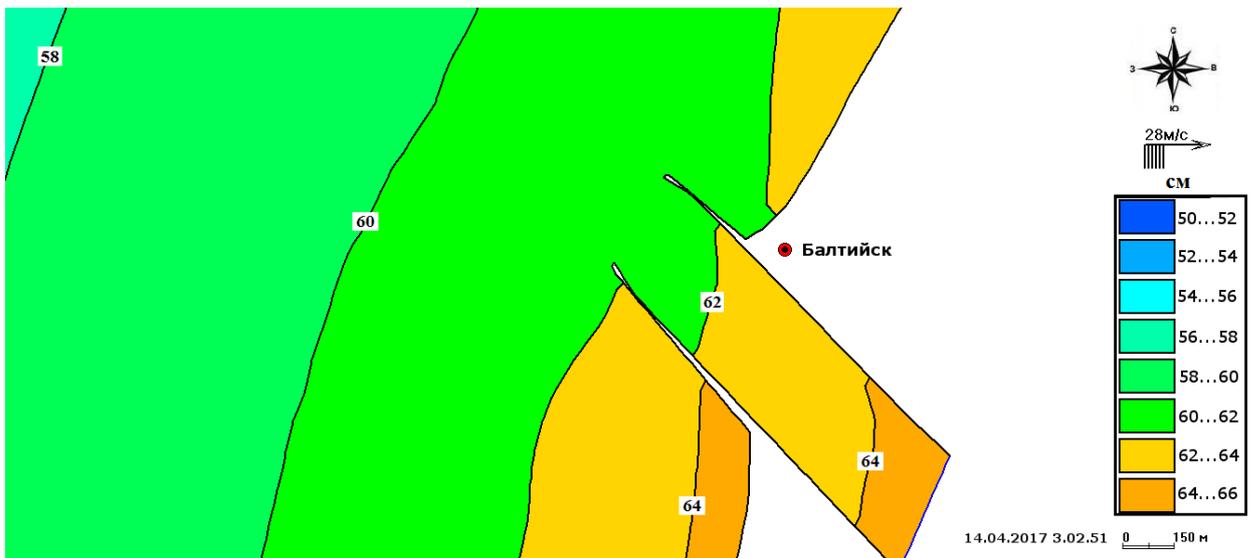
проливе от условной черты входа в Морской канал образовались чередующиеся зоны размыва и намыва по всей его длине одна за другой. Зона размыва -3000 см находится на пути огибания южного мола вдольбереговым потоком, зона намыва +29м примыкает вплотную к оголовку южного мола с наветренной стороны, затем снова следует зона размыва -34см и зона намыва +22м, далее вглубь Морского канала преобладает процесс заносимости фарватера (рис 44-45), что соответствует реальной ситуации по данным наблюдений.



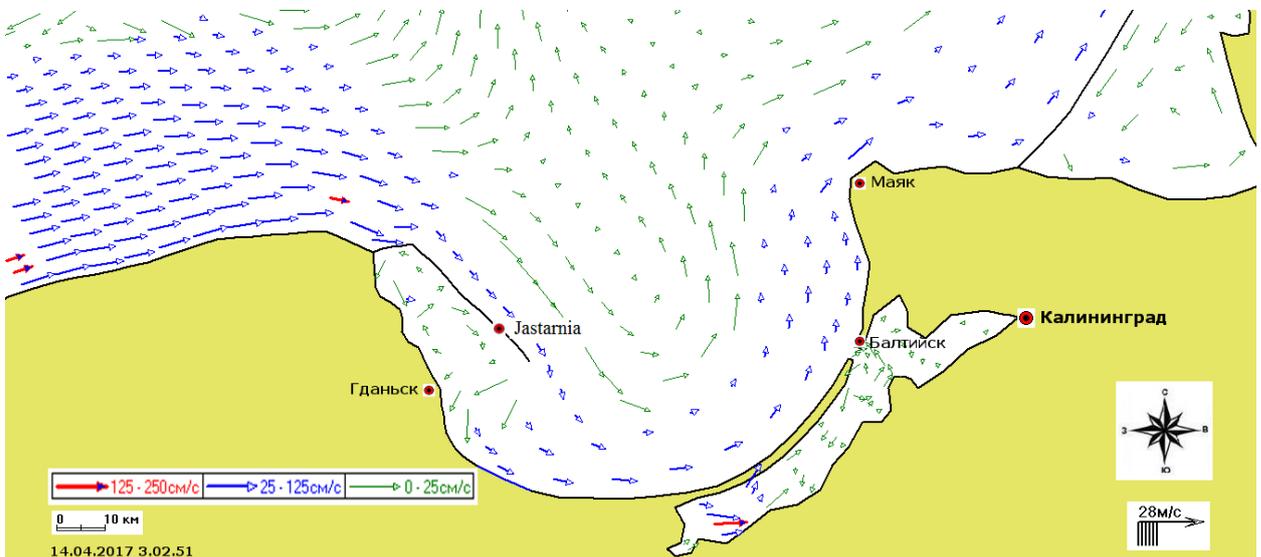
**Рисунок 24** Расчетное поле уровня (см), модель Балтийского моря BSM -2010 в районе Гданьского и Вислинского заливов с постоянным западным ветром 5% обеспеченности



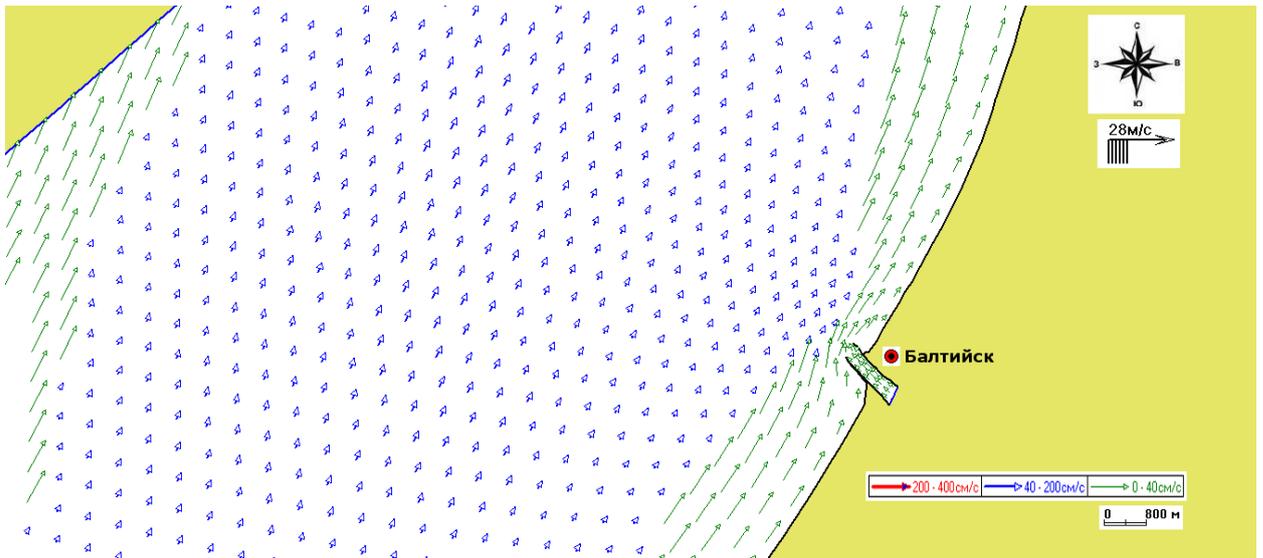
**Рисунок 25** Расчетное поле уровней (см). Локальная модели Гданьского залива в районе участка Балтийского пролива с постоянным западным ветром 5% обеспеченности



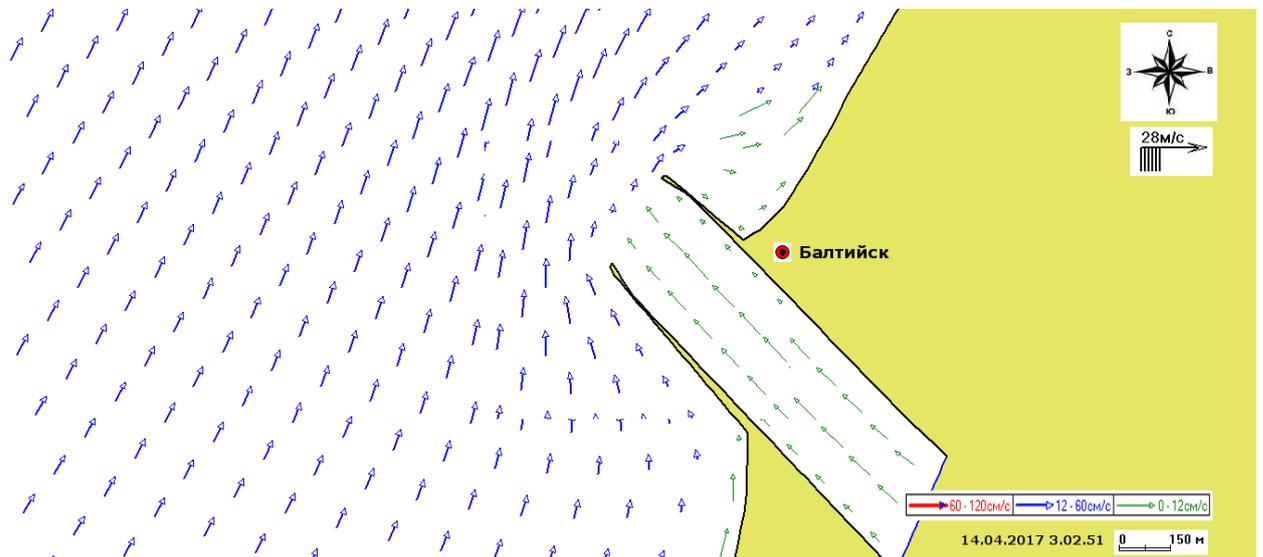
**Рисунок 26** Поле уровней (см) локальная модель Балтийского пролива в районе участка придонной эрозии с постоянным западным ветром 5% обеспеченности



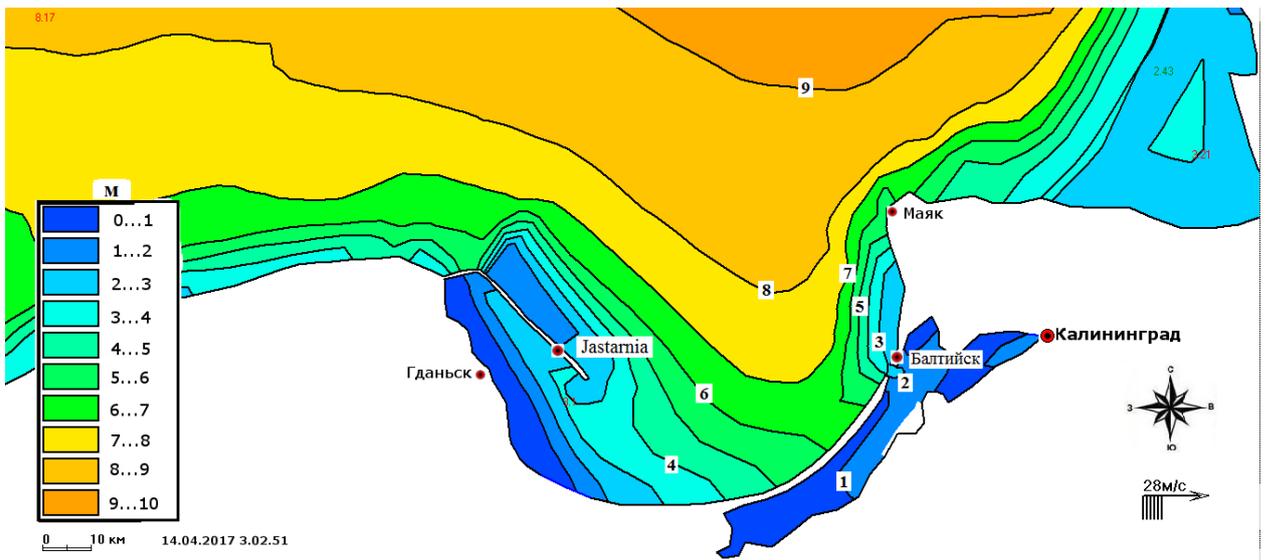
**Рисунок 27** Расчетное поле скорости течений (см/с) по модели Балтийского моря BSM -2010 в районе Гданьского и Вислинского заливов с постоянным заданным западным ветром 5% обеспеченности



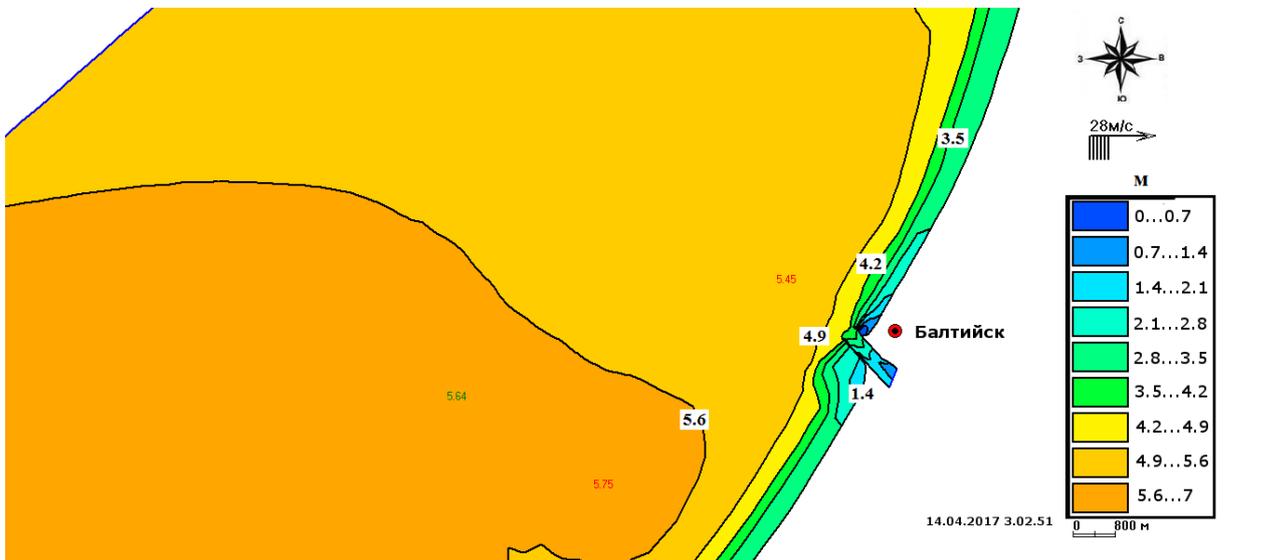
**Рисунок 28** Расчетное поле скорости течений (см/с) по локальной модели Гданьского залива в районе участка Балтийского пролива с постоянным заданным западным ветром 5% обеспеченности



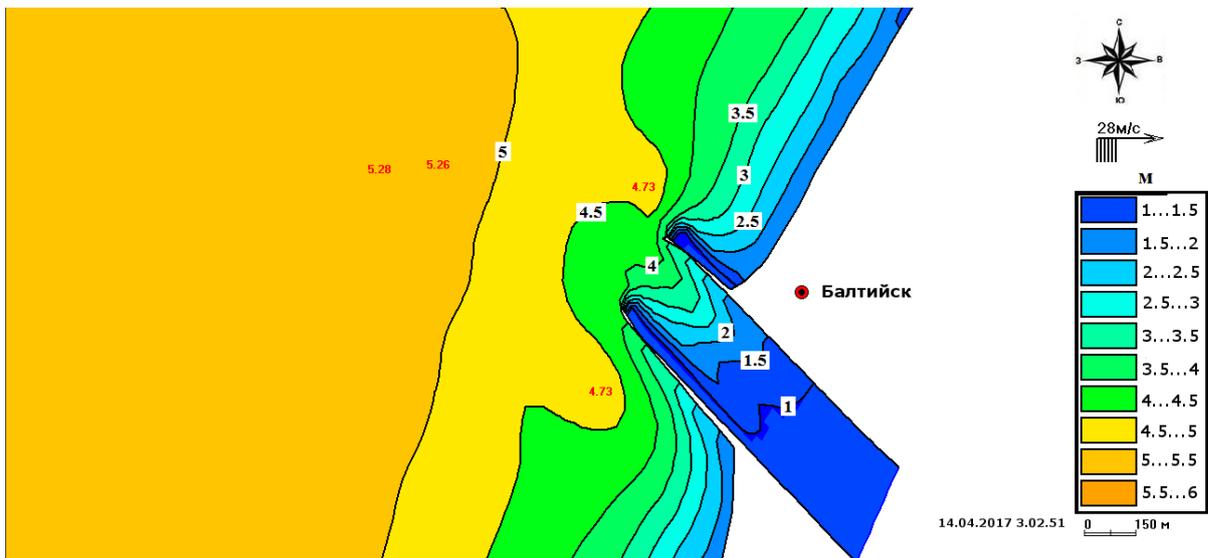
**Рисунок 29** Расчетное поле скорости течений (см/сек) по локальной модели Балтийского пролива в районе участка придонной эрозии с постоянным заданным западным ветром 5% обеспеченности



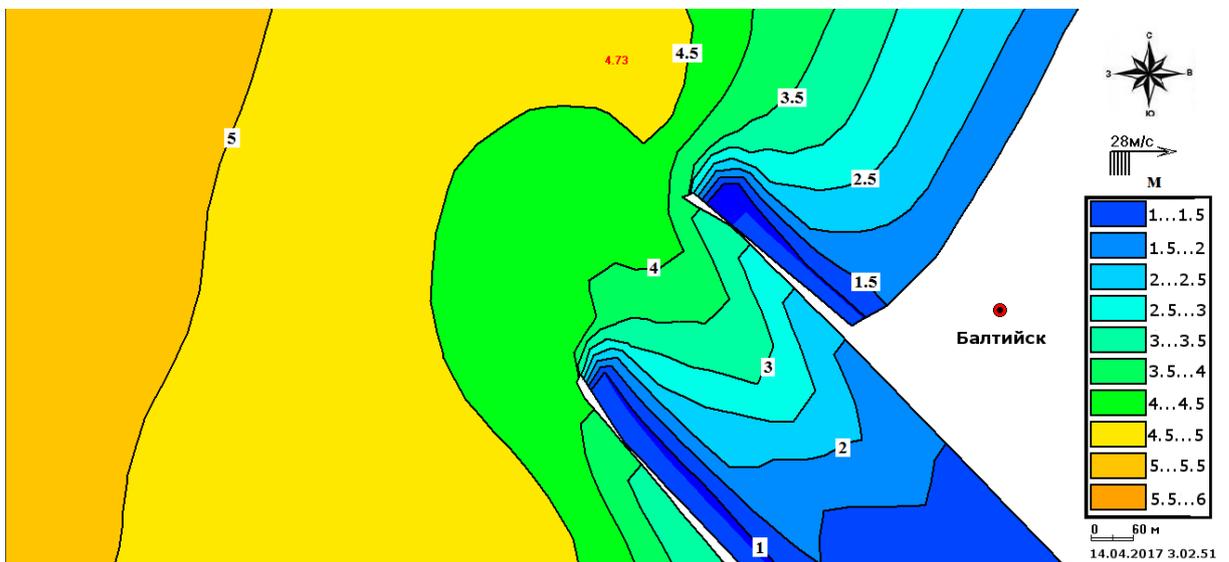
**Рисунок 30** Изолинии высоты ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по модели Балтийского моря BSM -2010



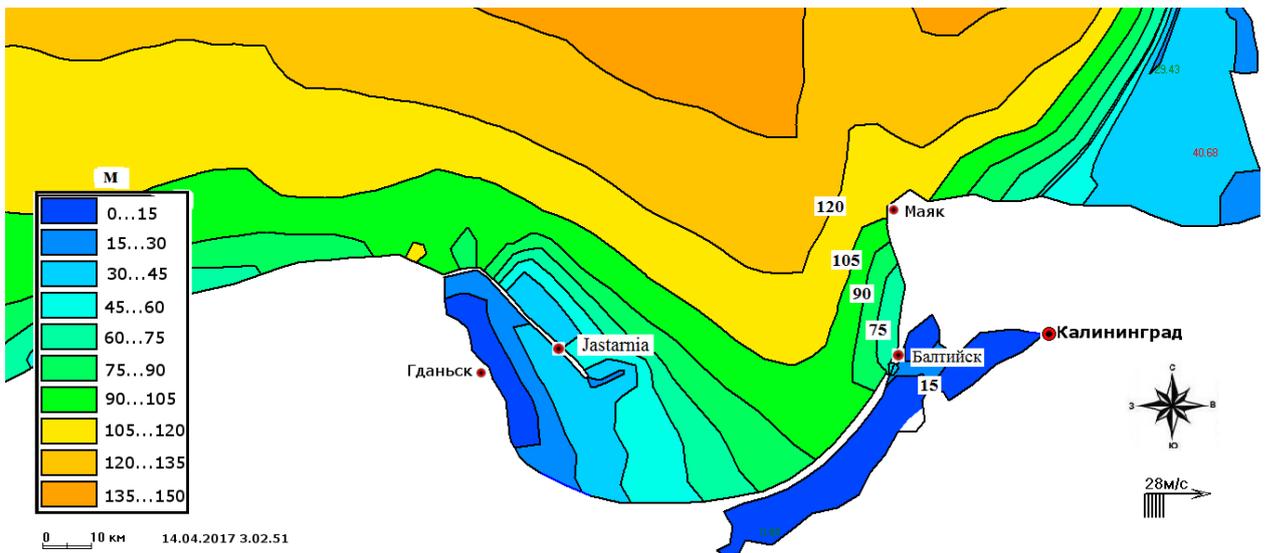
**Рисунок 31** Изолинии высоты ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Гданьского залива



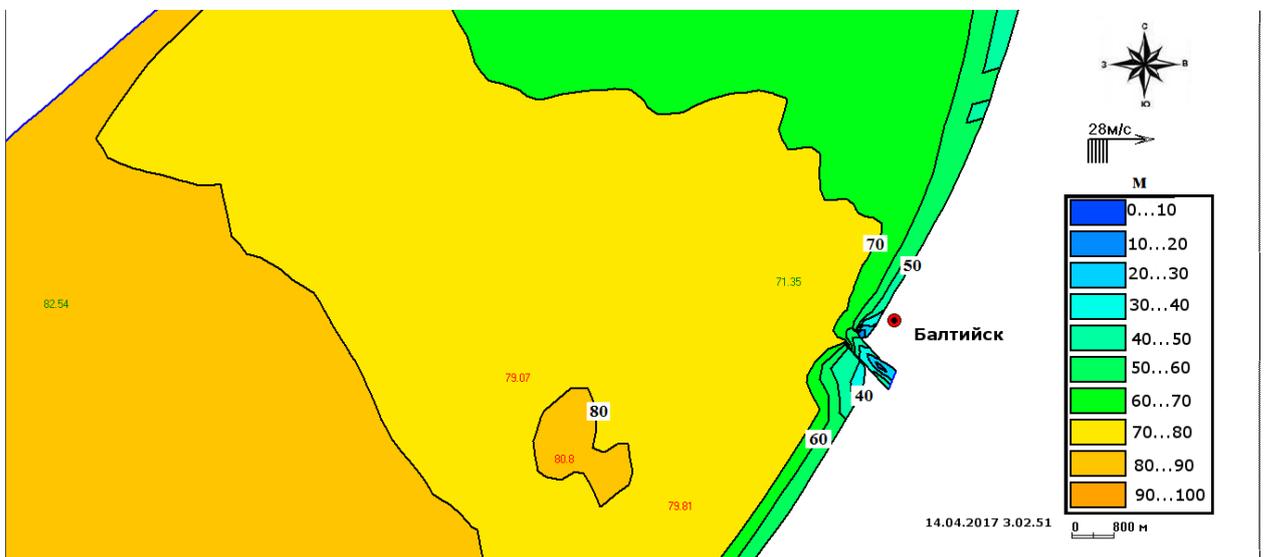
**Рисунок 32** Изолинии высоты ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива



**Рисунок 33** Изолинии высоты ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива



**Рисунок 34** Изолинии длины ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по модели Балтийского моря BSM -2010



**Рисунок 35** Изолинии длины ветровых волн (м) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Гданьского залива

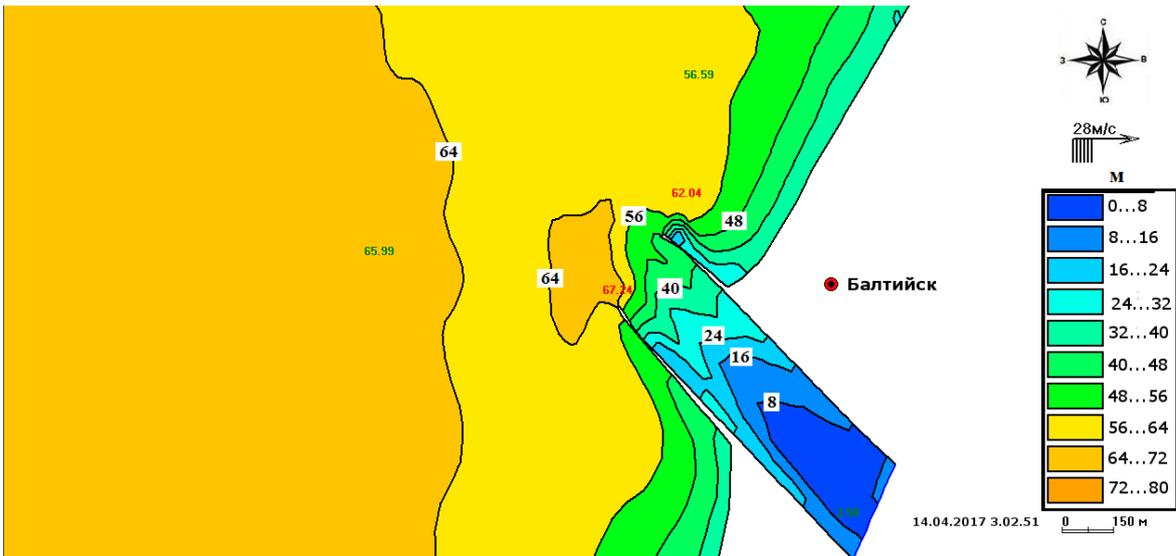


Рисунок 36 Изолинии длины (м) ветровых волн при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива

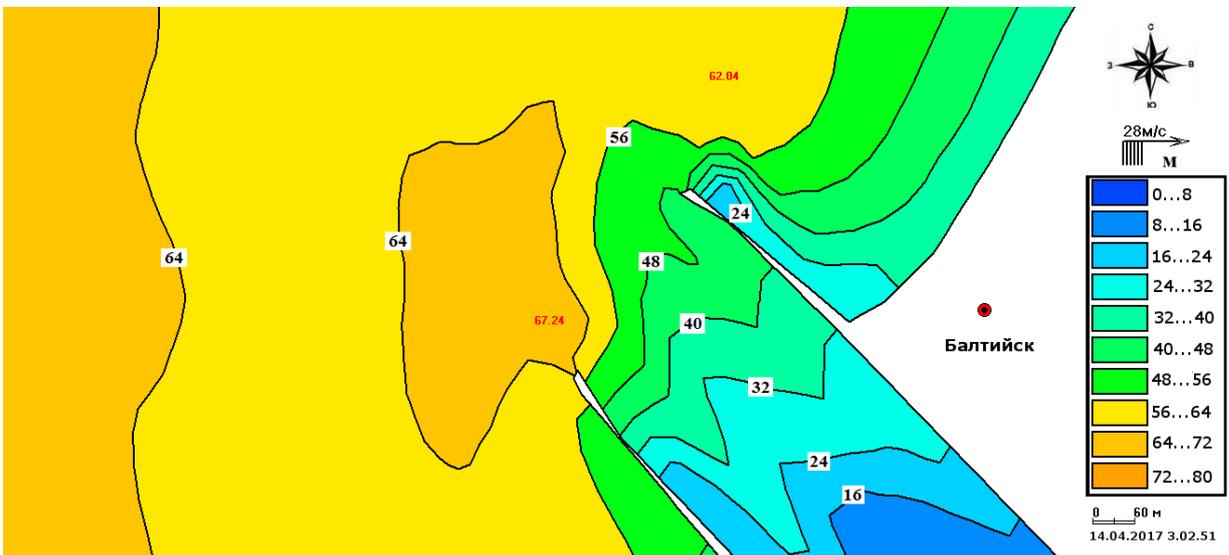
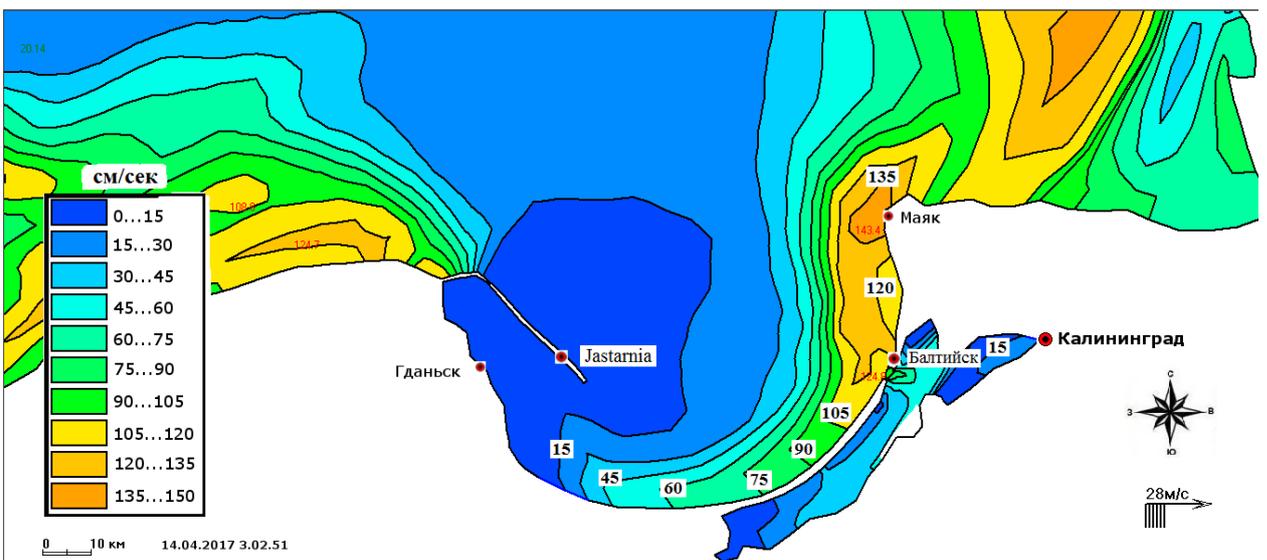
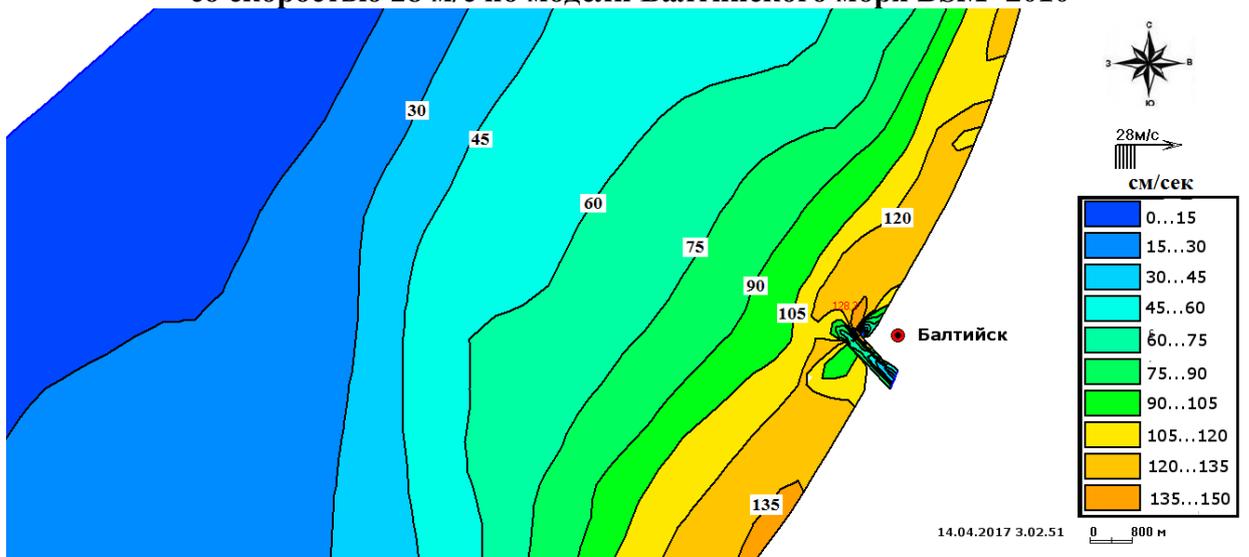


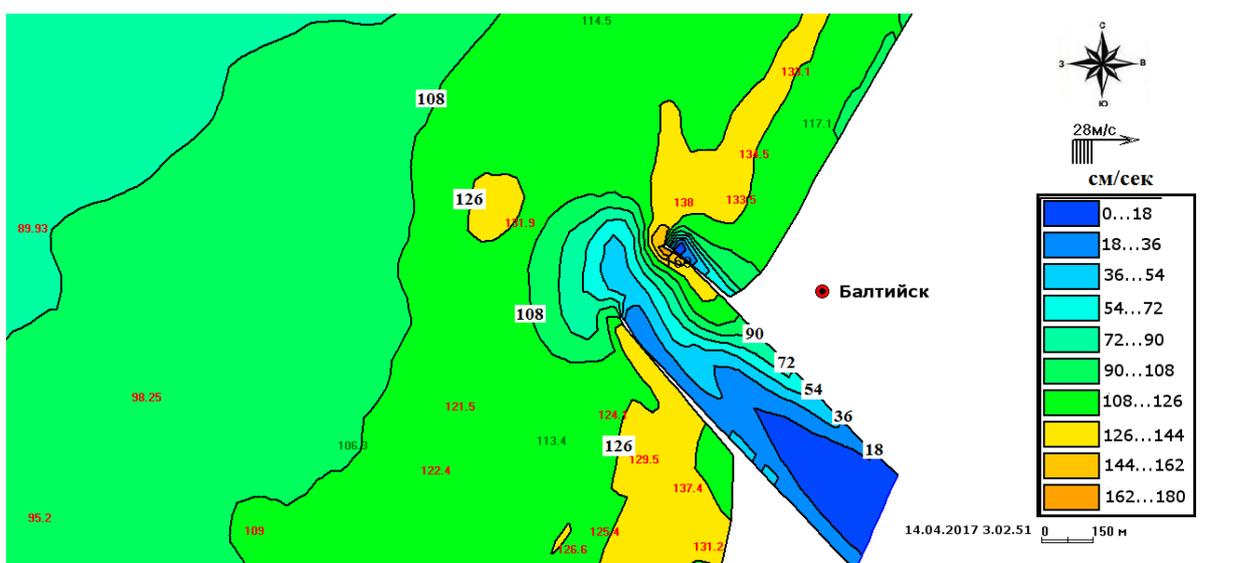
Рисунок 37 Изолинии длины (м) ветровых волн при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива



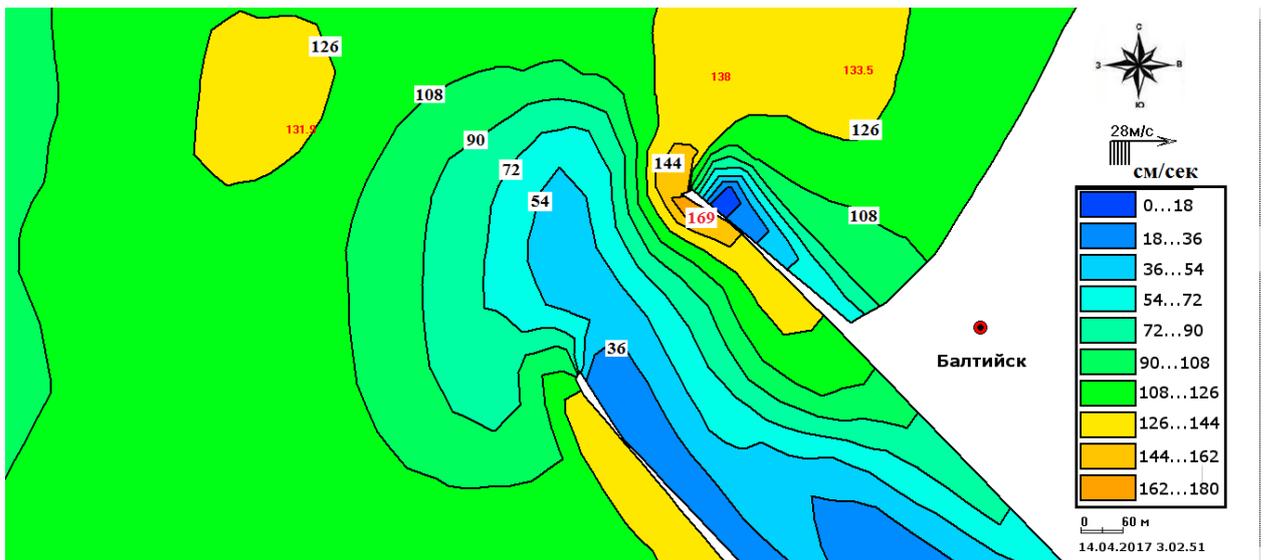
**Рисунок 38** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при западном ветре со скоростью 28 м/с по модели Балтийского моря BSM -2010



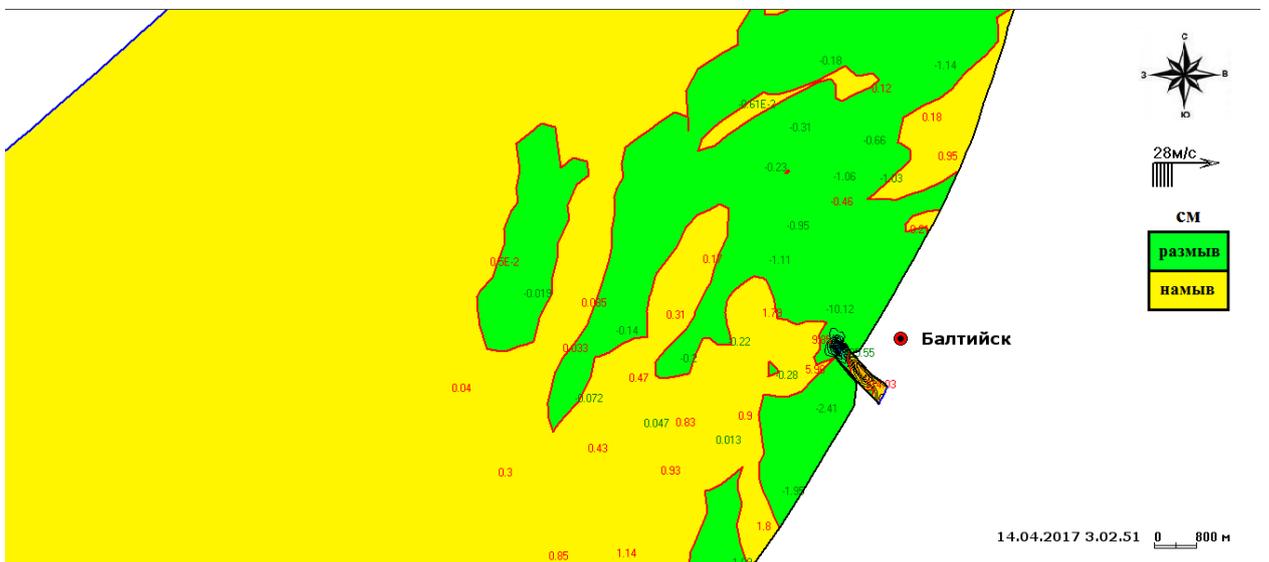
**Рисунок 39** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Гданьского залива



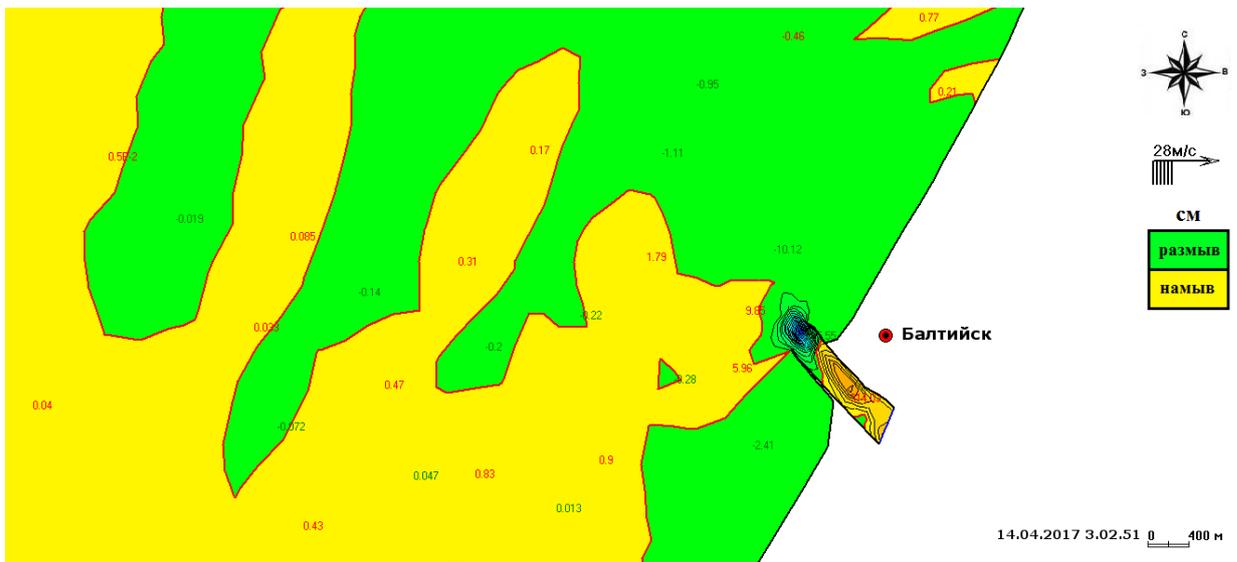
**Рисунок 40** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива



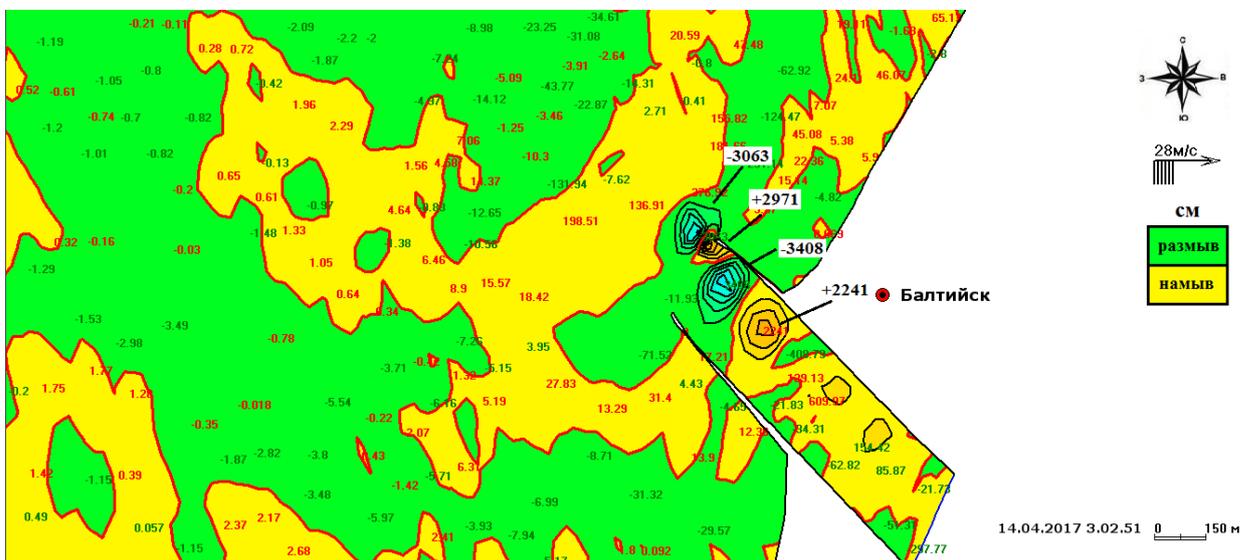
**Рисунок 41** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при западном ветре со скоростью 28 м/с по локальной модели Балтийского пролива



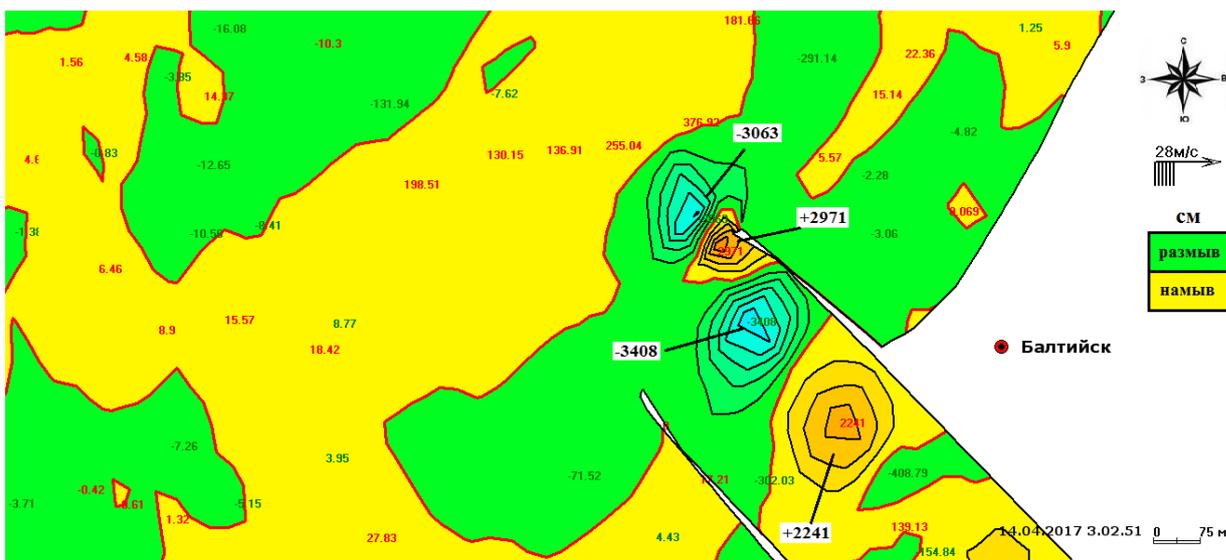
**Рисунок 42** Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Гданьского залива.



**Рисунок 43 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Гданьского залива.**



**Рисунок 44 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Балтийского пролива.**



**Рисунок 45 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Балтийского пролива.**

### 3.5.2 Результаты расчета при северном ветре

Расчеты выполнялись при постоянном действии ветра северного направления со скоростью 25 м/с [8].

Расчетный уровень в Юго-Восточной части Балтийского моря по BSM-2010 представлен на рисунке 46, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 47, по локальной модели Балтийского пролива на рисунке 48.

Основной перепад уровня в Юго-Восточной Балтике направлен с севера на юг по направлению действия ветра, в Гданьском заливе установился уровень 85 см. В Вислинском заливе под действием ветра произошел сгон воды в южную часть акватории, уровень 220 см (рис 46). В восточной части Гданьского залива уровень уменьшается с севера на юг, и у восточного побережья составляет 85 см. (рис 47). В Балтийском проливе, от условной линии входных ворот по направлению вглубь канала разность уровень повышается на 2 см. С наветренной стороны северного мола уровень воды 92 см, у оголовка северного мола сформировался локальный минимум со значениями от 86 до 88 см. С подветренной стороны головки южного мола уровень 88 см.(рис 48).

Скорость течений в Юго-Восточной части Балтийского моря по BSM-2010 представлена на рисунке 49, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 50, по локальной модели Балтийского пролива на рисунке 51.

Под действием постоянного северного ветра вдольбереговое течение Гданьского залива направлено с севера на юг, скорости течений в пределах от 25 до 125 см/сек с максимальными значениями в восточной части Гданьского залива. В Вислинском заливе скорость не превышает 20 см/сек (рис 49). В восточной части Гданьского залива на удалении от берега до изобаты 20м скорость течений около 75 см/сек (рис 50). В Балтийском проливе сформировался двухструйный режим входящих и выходящих течений со скоростями до 15 см/сек. На подходе к северному молу с наветренной стороны скорость вдольберегового течения около 60 см/сек, на этапе огибания головки северного мола течение достигает своего локального максимума скорости – 75 см/сек С подветренной стороны южного мола сформирована теньевая зона, скорость течений до 25 см/сек (рис 51).

Результаты расчета ветрового волнения при действии постоянного северного ветра 5% обеспеченности представлены на рисунках 52-55.

Высота волн в юго-восточной части Балтийского моря по SWAN-BSM-2010 представлена на рисунке 52, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 53, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 54-55.

Максимальная высота волн в северной части Гданьского залива 9м, в центральной части акватории высота волн 7м, на восток и запад от центра вдоль побережья значения изолиний плавно уменьшаются (рис 52). В восточной части Гданьского залива высота волн в пределах от 6 до 3 м (рис 53). От условной линии входных ворот вглубь Морского канала значения изолиний сокращаются от 3.5м до 1м (рис 54). С наветренной стороны северного мола высота волн от 1, а с подветренной от 3.5м (рис 55).

Высоты волн хорошо подчиняются правилу Рэлея. При таком распределении при значимой высоте волн 1 м одна из 10 волн будет выше 1.07 м, одна из 100 выше 1.51 м, а одна из 1000 выше 1.86 м [8]

Длина волн в юго-восточной части Балтийского моря по SWAN-BSM-2010 представлена на рисунке 56, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 57, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 58-59.

Максимальная длина волн в северной части Гданьского залива 153.9м, в центральной части залива длина волн от 135м до 120м, на север и восток от центра акватории вдоль побережья залива градиент изолиний плавно уменьшается (рис 56). В Восточной части Гданьского залива длина волн от 90м до 60м (рис 57). В Балтийском проливе длина волн от 56м до 8м (рис 58). С наветренной стороны оголовка северного мола длина волн от 24м, а с подветренной стороны от 48м (рис 59).

Придонная орбитальная скорость в юго-восточной части Балтийского моря по SWAN-BSM-2010 представлена на рисунке 60, по локальной модели Гданьского залива на рисунке 61, по локальной модели Балтийского пролива на рисунках 62-63.

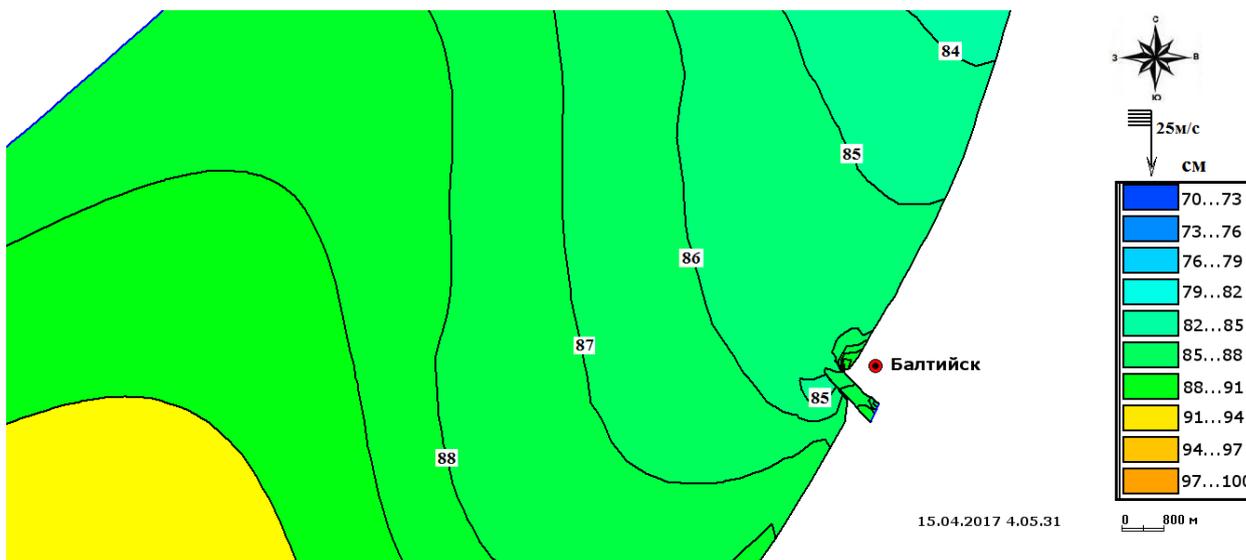
Градиент изолиний придонной орбитальной скорости направлен по направлению действия ветра с севера на юг, в северной части Гданьского залива (120см/сек) и в районе мыса Таран (135см/сек) достигает своего локального максимума (рис 60). В восточной части Гданьского залива придонная орбитальная скорость от 160 до 135 см/сек (рис 61). В Балтийском проливе от 64 до 16 см/сек (рис 62). С наветренной стороны оголовка северного мола сформировался локальный максимум придонной орбитальной скорости 159.5см/сек, с подветренной стороны значения от 112 до 128 см/сек. На входе в Морской канал изолинии придонной орбитальной скорости в пределах от 96см/сек до 40см/сек повторяют очертания придонной эрозионной депрессии (рис 63).

Результаты расчета деформации дна на 2 суток при постоянном действии штормового северного ветра 5% обеспеченности, рассчитанные по локальной модели Гданьского залива, представлены на рисунках 64-65, по локальной модели Балтийского моря на рисунках 66-67. Желтым цветом обозначены зоны аккумуляции - намыв, зеленым зоны эрозии - размыв.

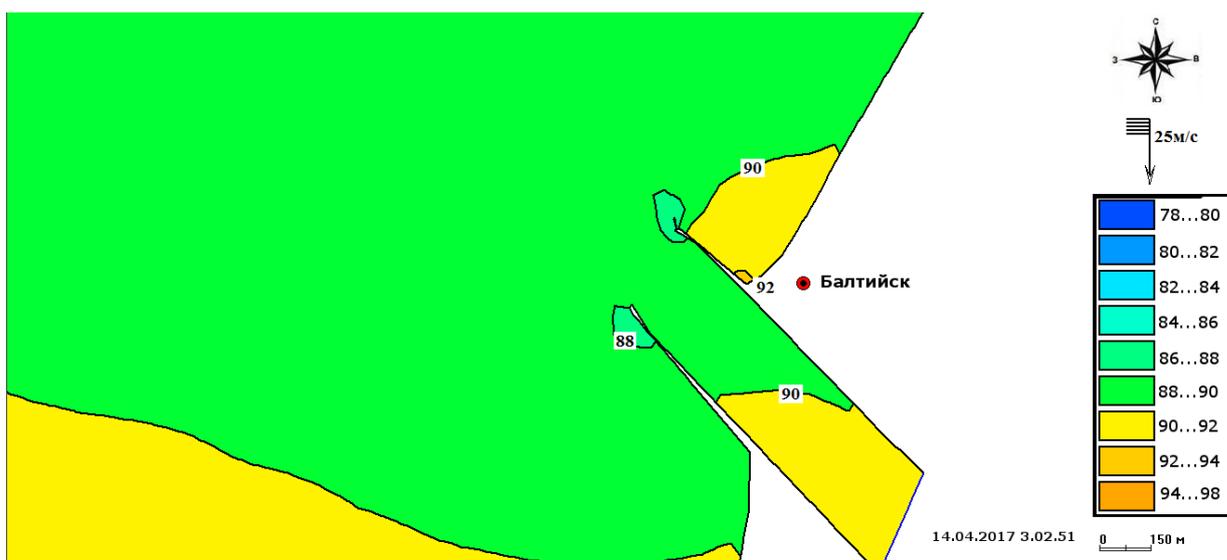
Вдольбереговое течение, направленное с севера на юг со скоростью около 70 см/с, у побережья восточной части Гданьского залива сформировало стабильную зону размыва/намыва со средними значениями +/- 1см (рис 64). Процесс аккумуляции до +14см преобладает с наветренной стороны Балтийского пролива, процесс эрозии преобладает южнее Балтийского пролива до -17см (рис 65). Перед входом в Балтийский пролив образовалась локальная зона намыва до +70см, южнее зона локальная размыва до -76см (рис 66). С наветренной стороны оголовка северного мола образовался намыв +4.5 м, на входе в морской канал в районе исследования преобладает процесс эрозии, что соответствует с реальной картиной по данным наблюдений. С подветренной стороны оголовка северного мола, при его огибании вдольбереговым течением со скоростью 70см/сек образовалась зона размыва -13м, дальше вглубь канала следует очередная зона размыва - 10м, а за ней зона намыва +7м, дальше вглубь канала идет процесс заносимости фарватера +2м (рис 67).



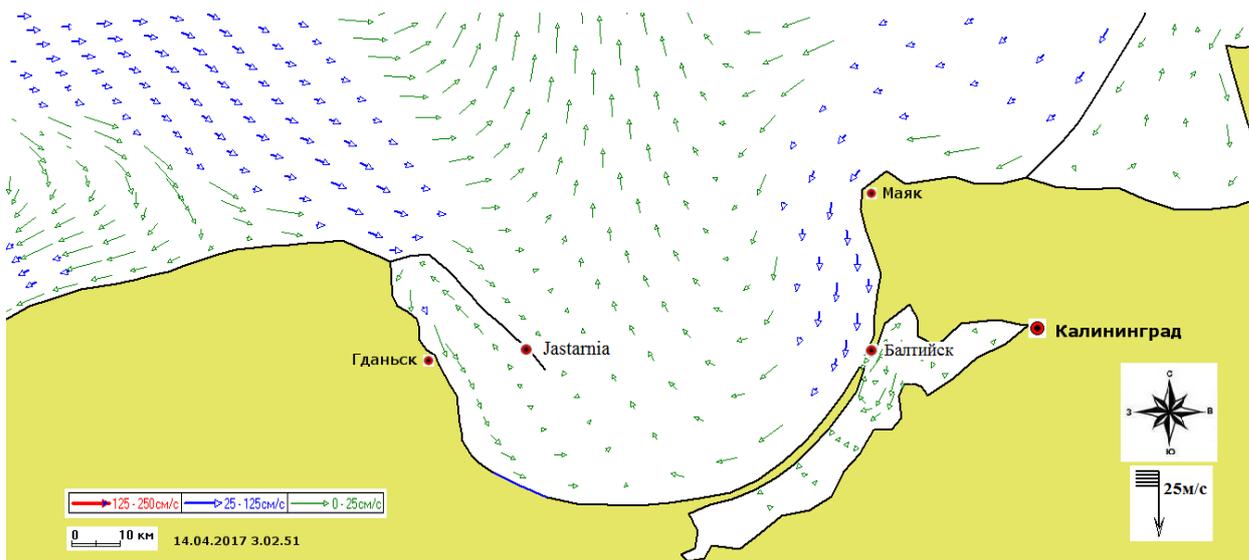
**Рисунок 46** Расчетное поле уровня (см) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, модель Балтийского моря BSM -2010 в районе Гданьского и Вислинского заливов.



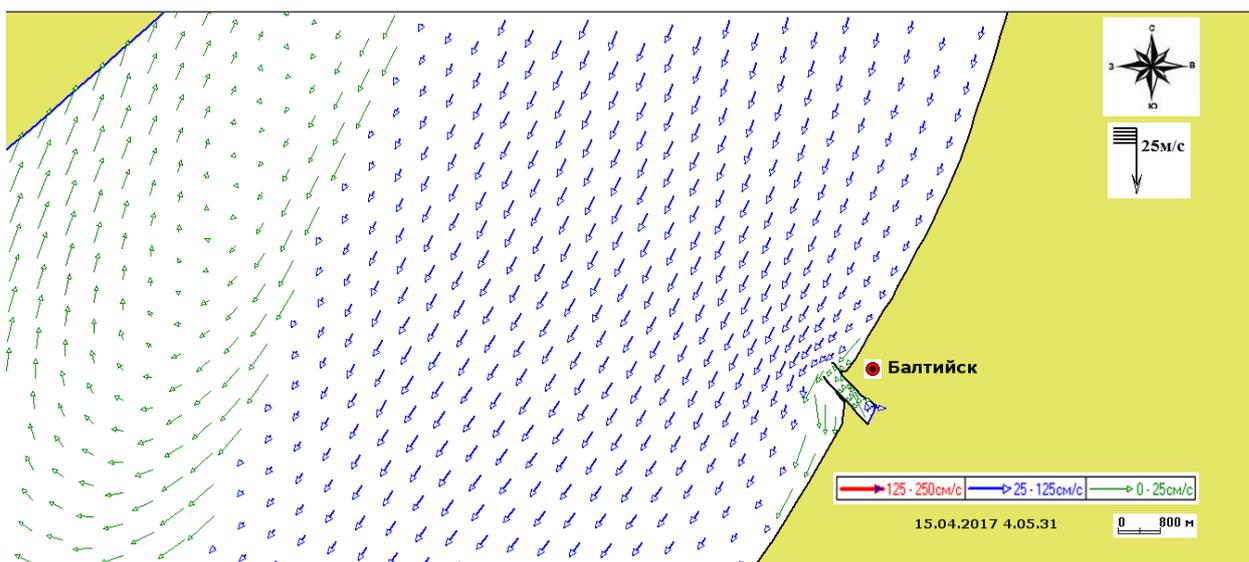
**Рисунок 47** Расчетное поле уровня (см) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, локальная модель Гданьского залива



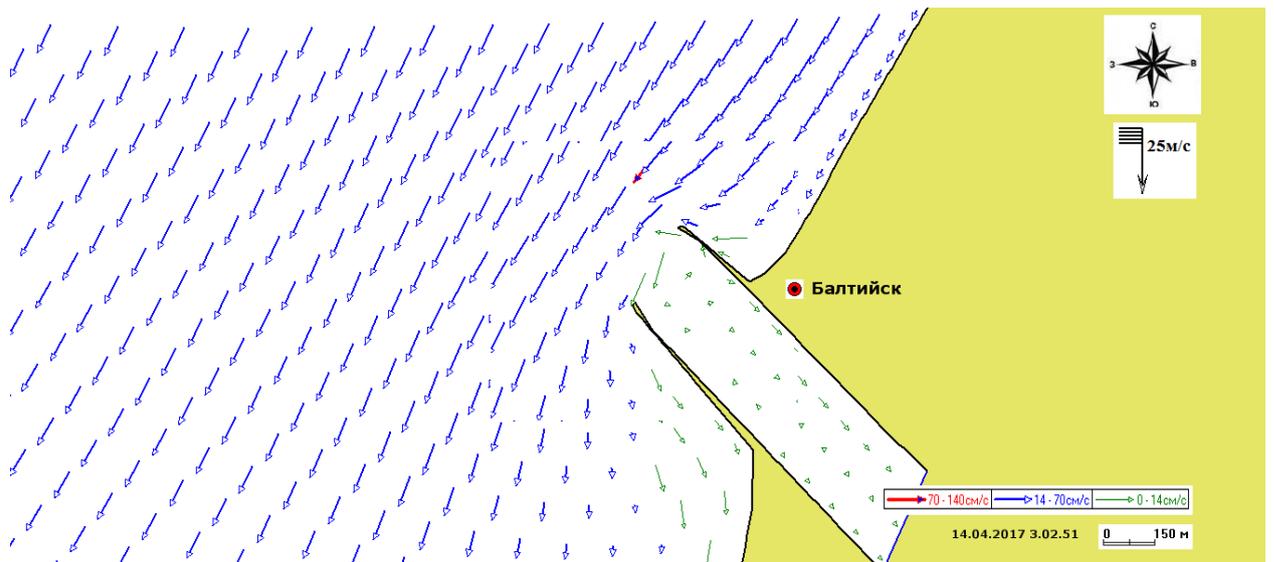
**Рисунок 48** Расчетное поле уровня (см) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, локальная модель Балтийского пролива



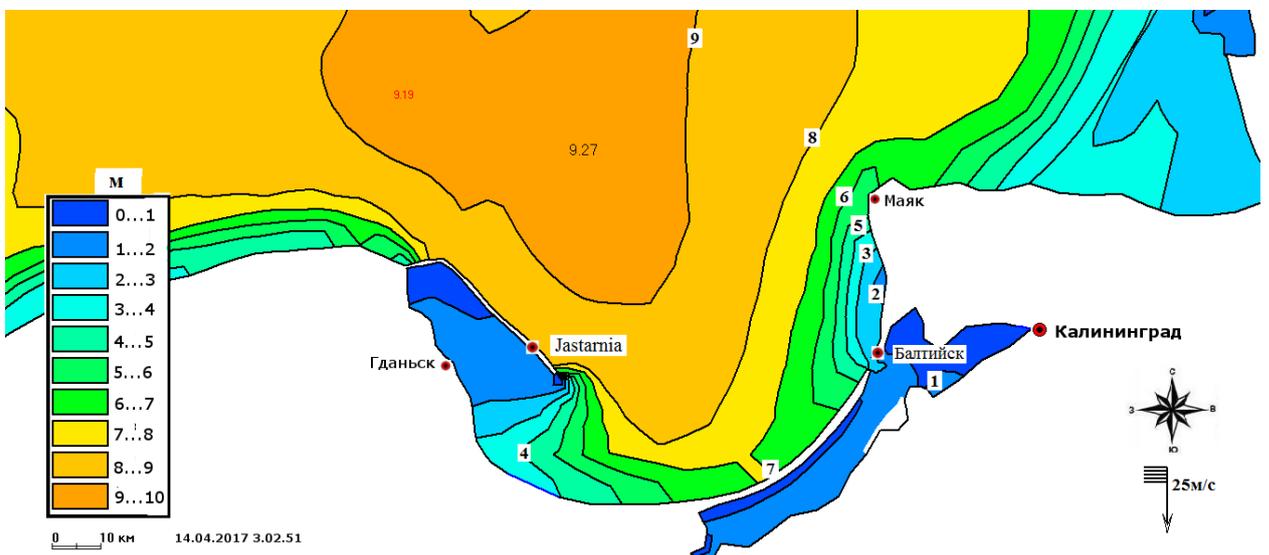
**Рисунок 49 Вектора скорости течений (см/с) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, модель Балтийского моря BSM -2010 в районе Гданьского и Вислинского заливов.**



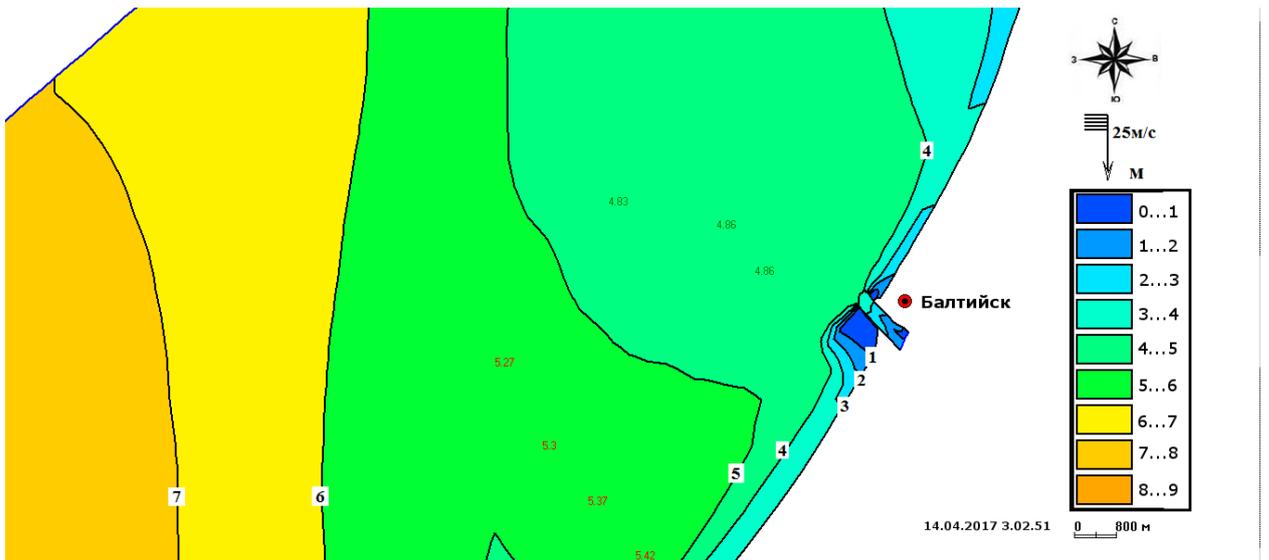
**Рисунок 50 Вектора скорости течений (см/с) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, локальная модель Гданьского залива**



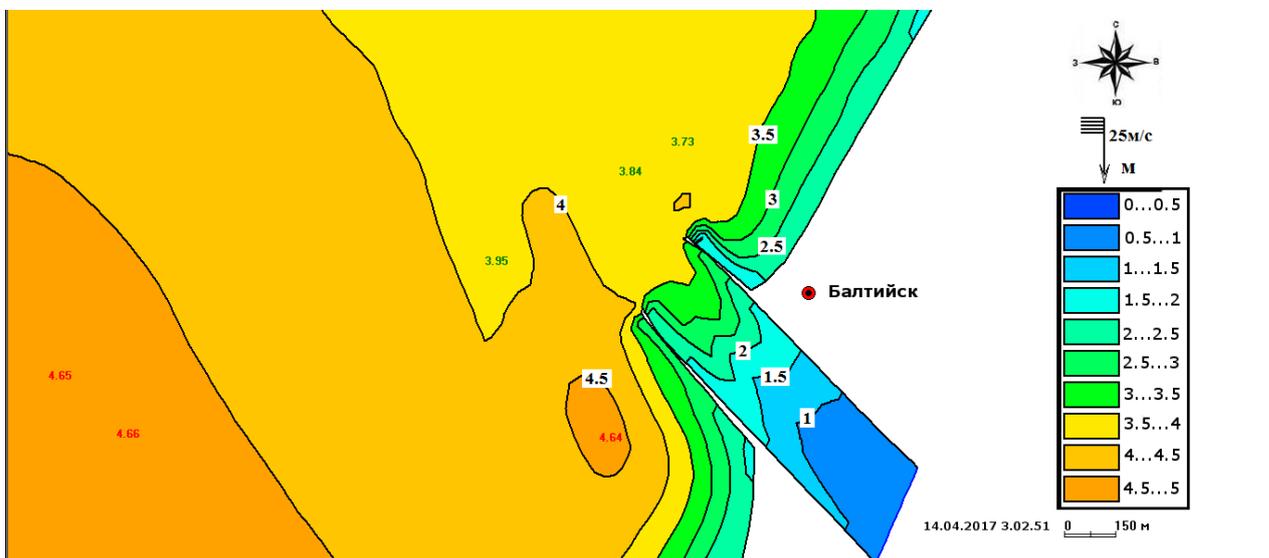
**Рисунок 51 Вектора скорости течений (см/с) при постоянном северном ветре 5% обеспеченности, локальная модель Балтийского пролива**



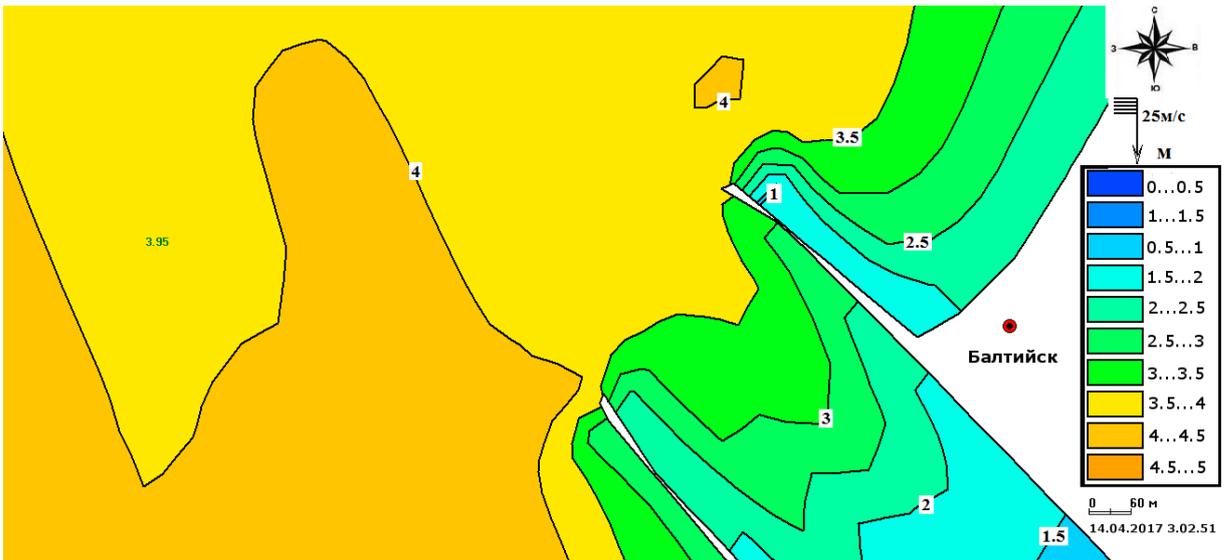
**Рисунок 52 Изолинии высоты ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с, модель Балтийского моря BSM -2010**



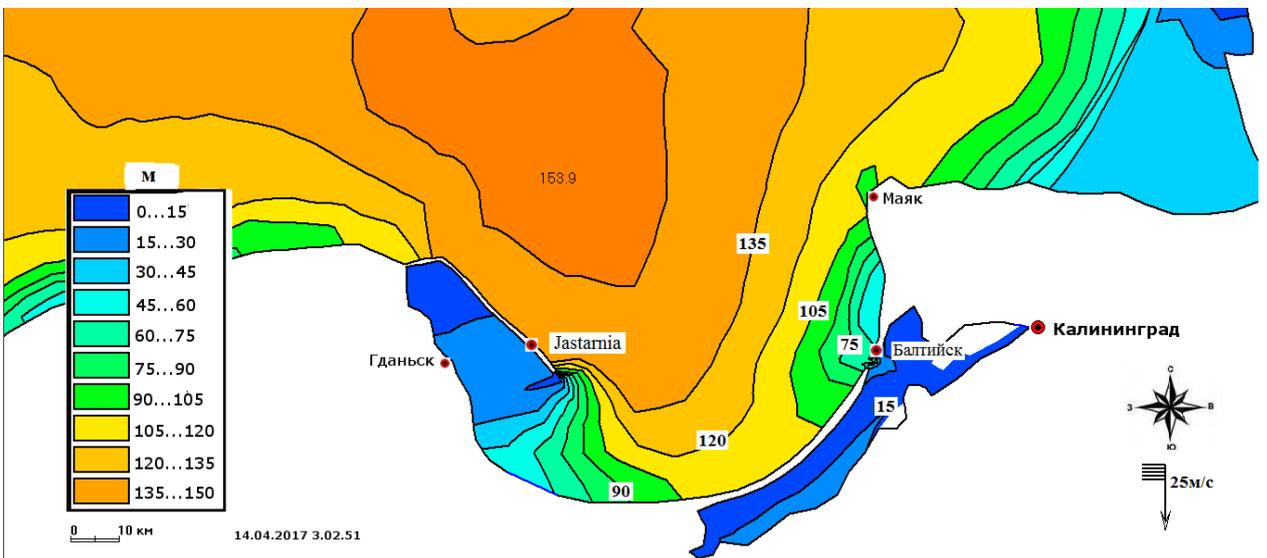
**Рисунок 53** Изолинии высоты ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с, локальная модель Гданьского залива



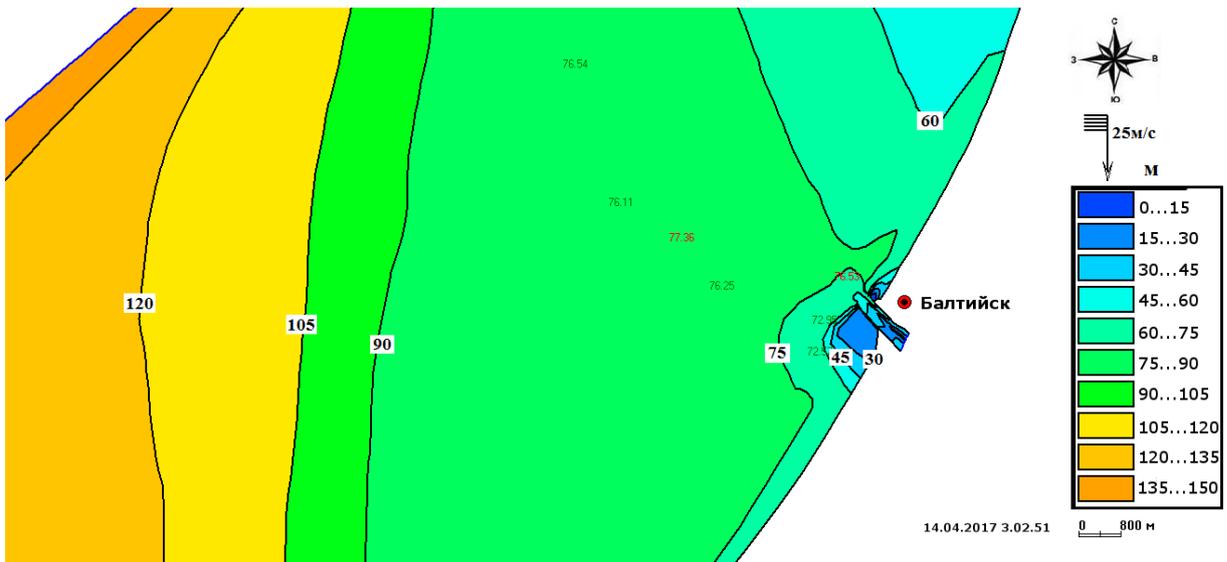
**Рисунок 54** Изолинии высоты ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с локальная модель Балтийского пролива



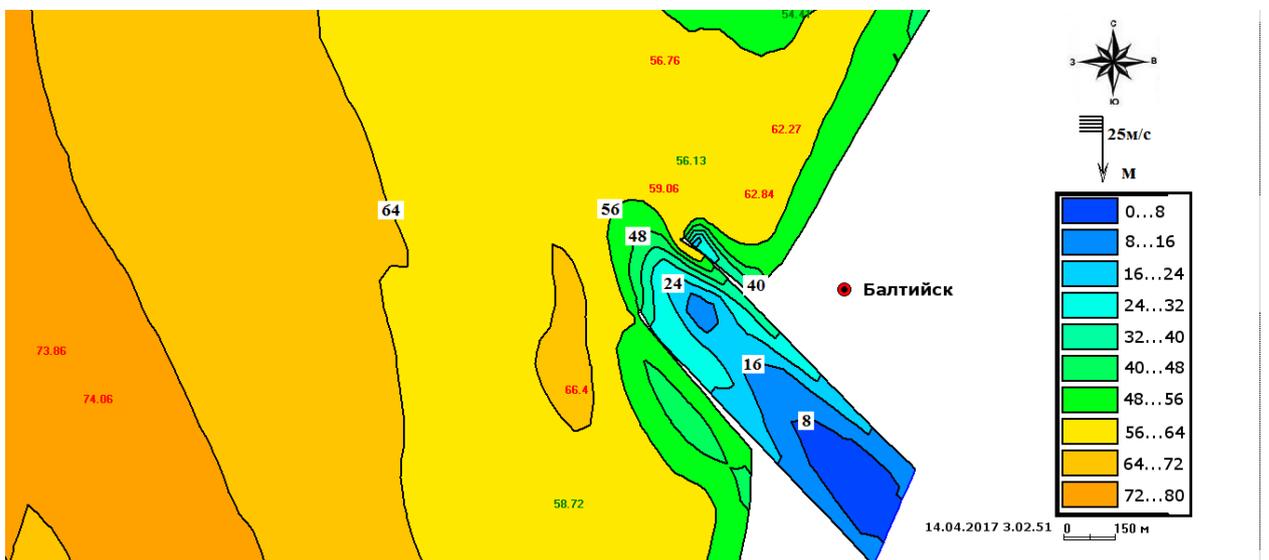
**Рисунок 55** Изолинии высоты ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с локальная модель Балтийского пролива



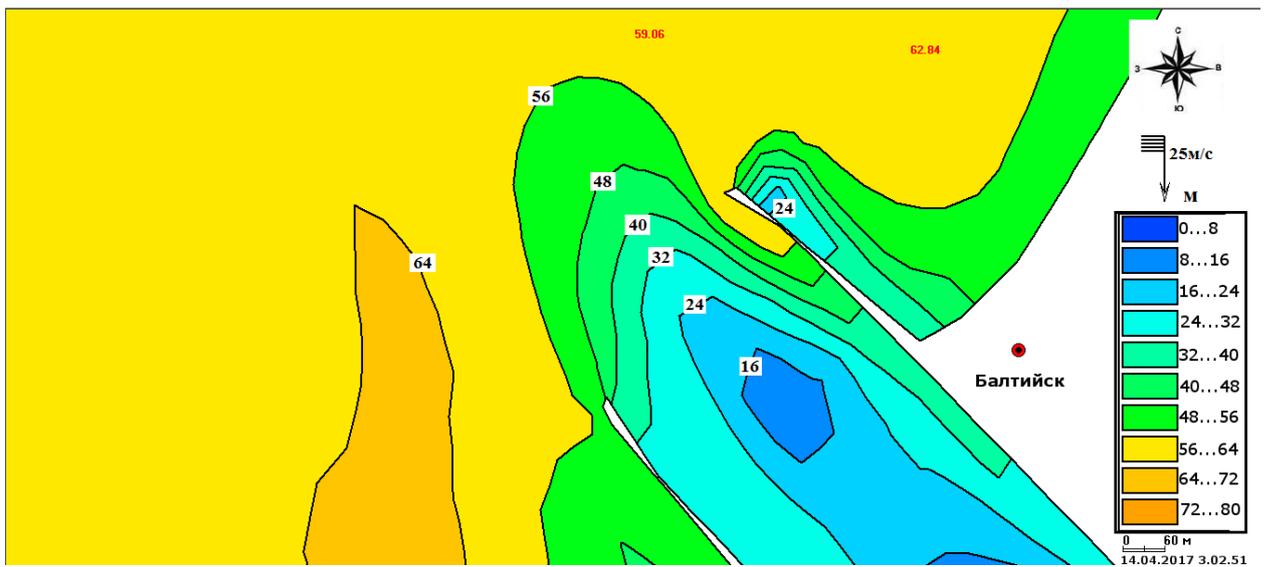
**Рисунок 56** Изолинии длины ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с модель Балтийского моря BSM -2010



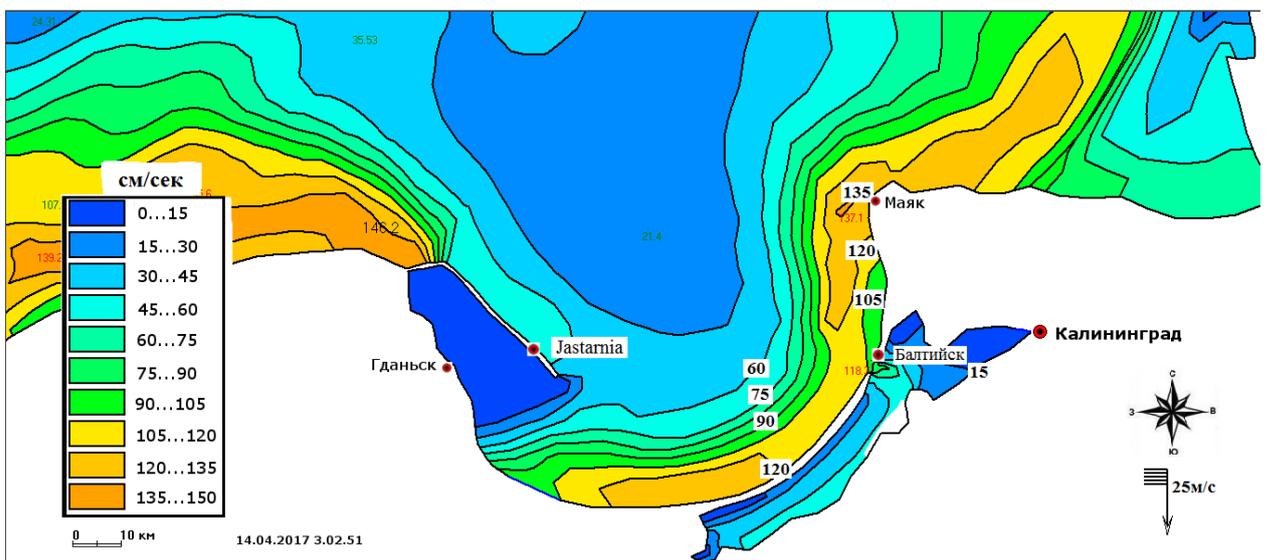
**Рисунок 57** Изолинии длины ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с локальная модель Гданьского залива



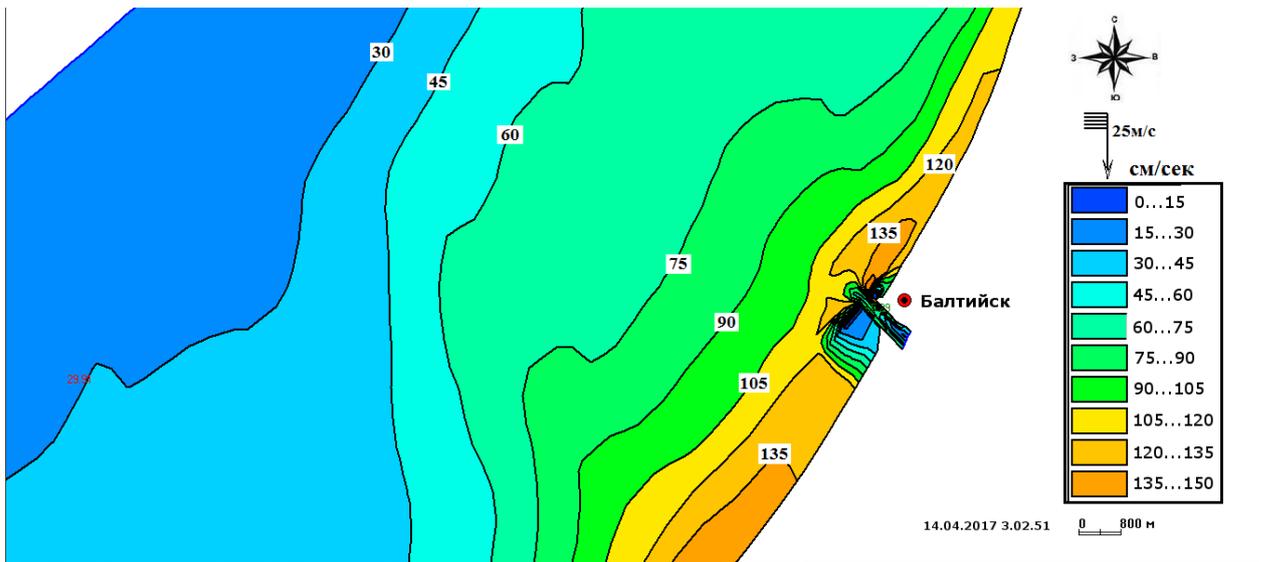
**Рисунок 58** Изолинии длины ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с локальная модель Балтийского пролива



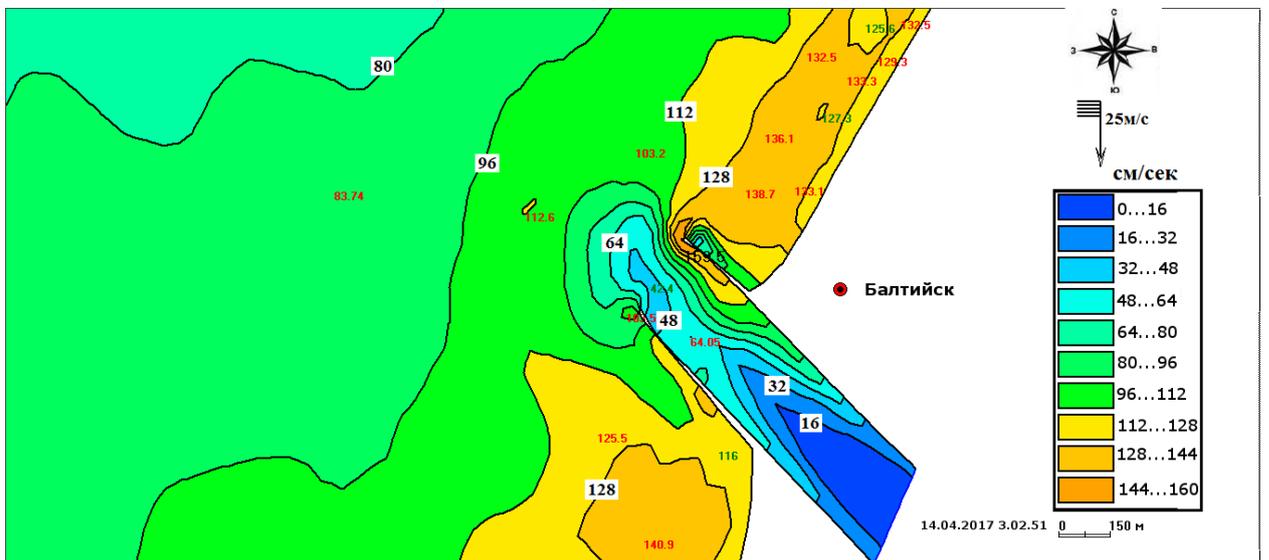
**Рисунок 59** Изолинии длины ветровых волн (м) при северном ветре со скоростью 25 м/с локальная модель Балтийского пролива



**Рисунок 60** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при северном ветре со скоростью 25 м/с модель Балтийского моря BSM-2010



**Рисунок 61** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при северном ветре со скоростью 25 м/с, локальная модель Гданьского залива



**Рисунок 62** Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при северном ветре со скоростью 25 м/с, локальная модель Балтийского пролива

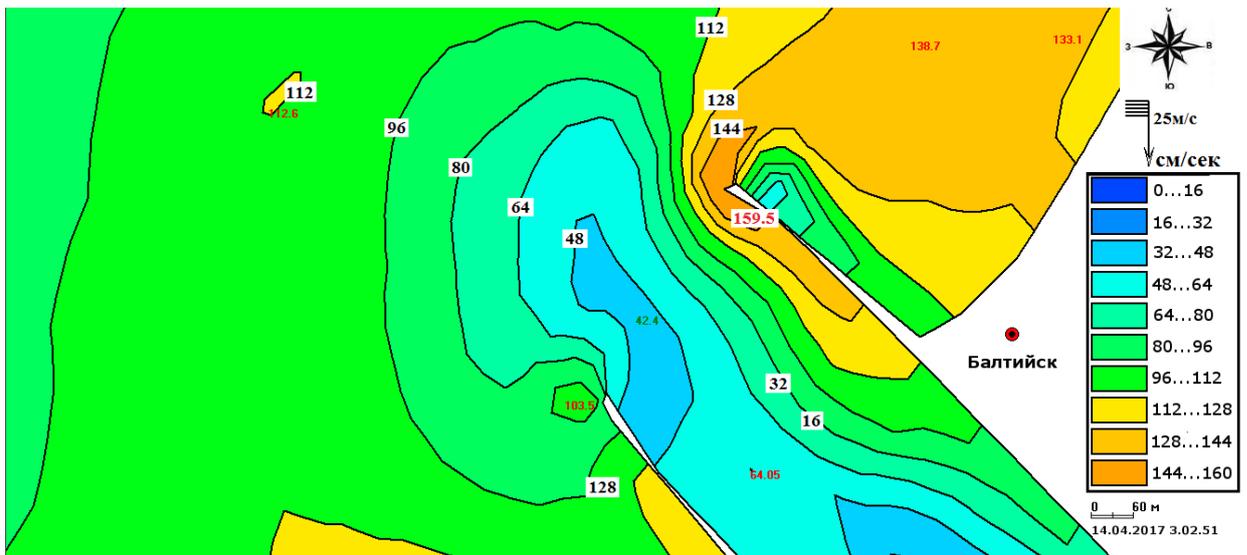


Рисунок 63 Изолинии придонной орбитальной скорости (см/сек) при северном ветре со скоростью 25 м/с, локальная модель Балтийского пролива

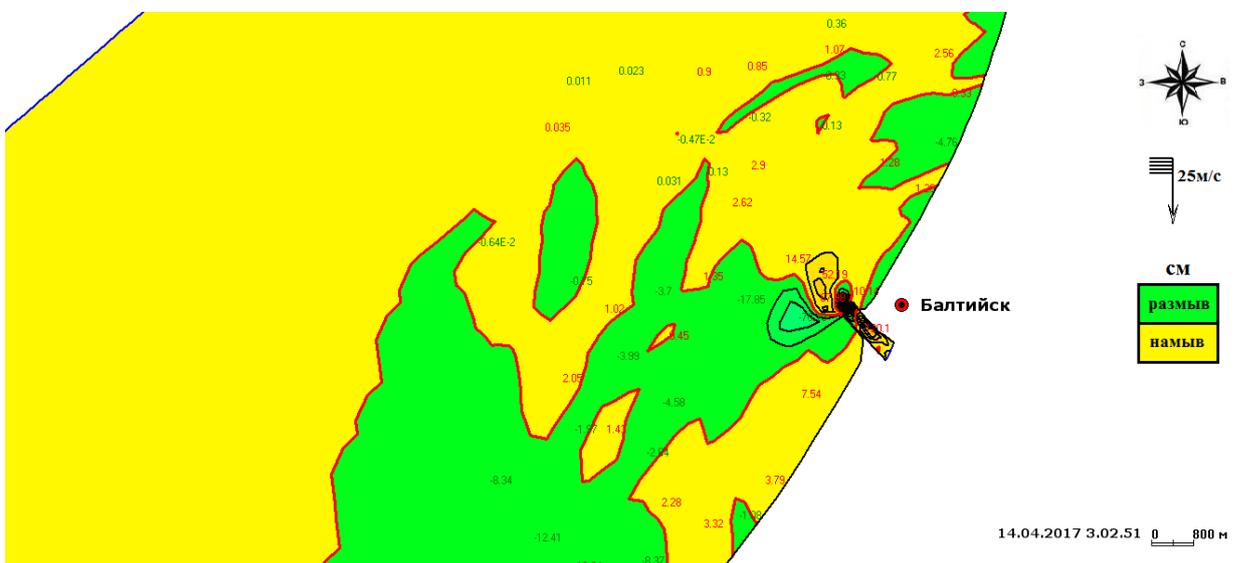
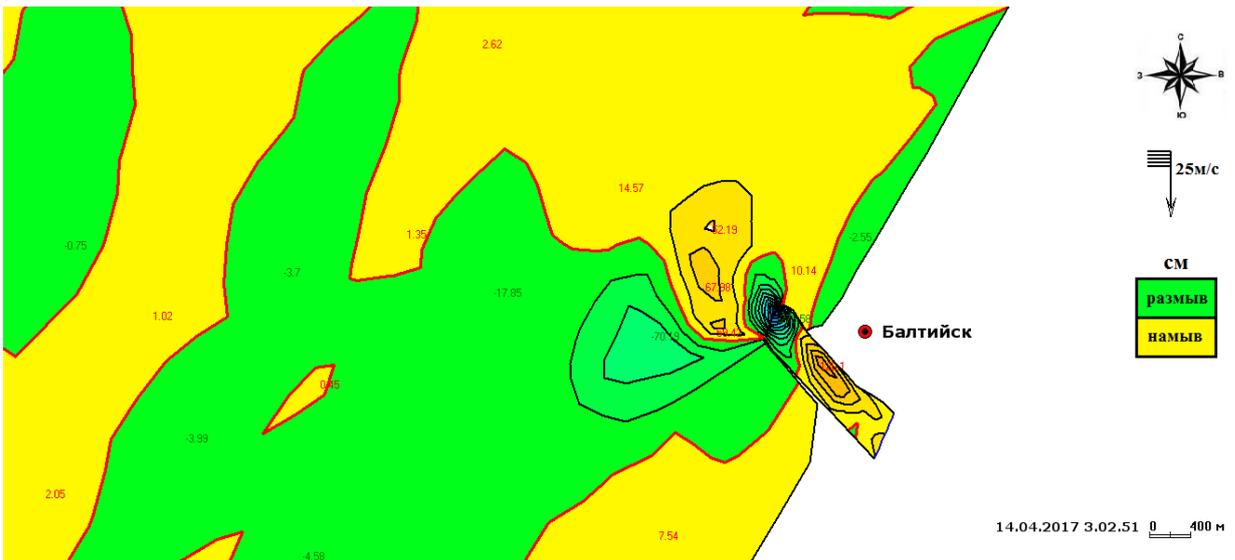
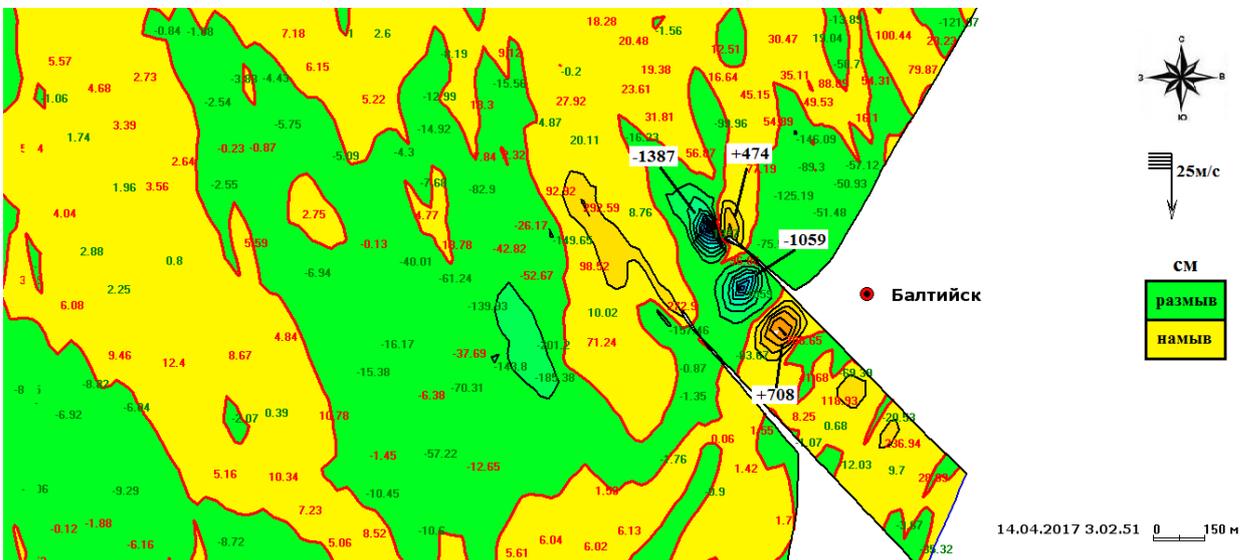


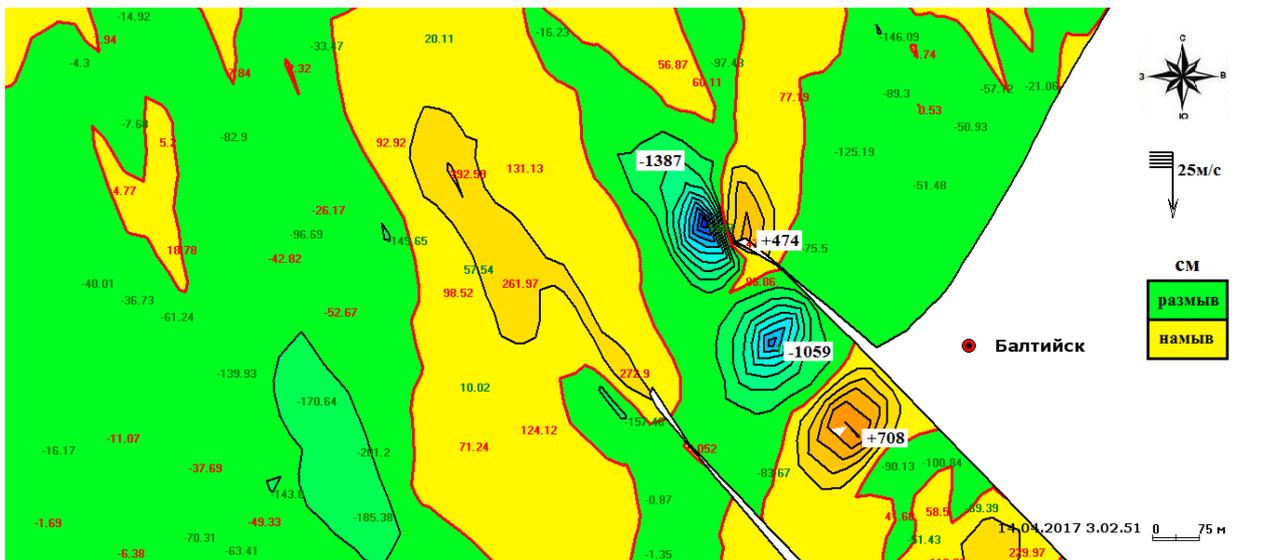
Рисунок 64 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Гданьского залива.



**Рисунок 65 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Гданьского залива.**



**Рисунок 66 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Балтийского пролива.**



**Рисунок 67 Деформация дна (см). Положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия. Локальная модель Балтийского пролива.**

Результаты расчета деформации дна при постоянном западном ветре 5% обеспеченности показали, что при взаимодействии вдольберегового потока наносов, направленного с севера на юг и выдвинутых в море оградительных молов, значительных изменений не наблюдается, но в районе оголовка северного мола произошло сглаживание контуров «языка наносов» и удлинение депрессии в северном направлении. Полученный результат соответствует картине происходящего по данным наблюдений, за исключением того, что у основания оголовка южного мола существенной деформации дна не произошло.

Результаты расчета деформации дна при постоянном северном ветре 5% обеспеченности показали, что при взаимодействии вдольберегового потока наносов направленного с севера на юг и выдвинутых в море оградительных молов произошло увеличение глубины в области охватывания северного мола «языком наносов» депрессии. У основания южного мола существенной деформации дна не произошло.

Математическое моделирование показало, что депрессия, при экстремальных скоростях северного и западного ветра, существенно не меняется, в области основания южного мола значительных изменений не зафиксировано, в обоих случаях моделирования процесс деформации дна

преобладал у основания северного мола и дальше вглубь канала. Таким образом, в ходе моделирования удалось воссоздать только процесс миграции кромки депрессии в районе охвата «языком наносов» северного мола, под действием экстремального западного ветра происходит сглаживание «языка наносов», что совпадает с данными наблюдений. Параллельно поставленным задачам, при расчете деформации дна был воссоздан процесс заносимости фарватера Морского канала.

Вероятнее всего, транспорт донных отложений в районе депрессии на входе в Морской канал обладает дополнительными механизмами, которые не были учтены в моделирующей системе CARDINAL, что объясняет отличие результатов моделирования от результатов анализа многолетней динамики морфометрии депрессии по данным наблюдений. Так же короткий по времени расчет деформации дна мог не дать того эффекта который наблюдается на протяжении 200 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ многолетней динамики морфометрии депрессии расположенной на входе в Калининградский морской канал показал, что в период с 2008 по 2016г депрессия, в целом, не изменила своих очертаний, за исключением сглаживания «языка наносов» у основания северного мола. Центральная и примоловая вершины к 2016г слились в одну, а максимальная глубина с каждым годом увеличивается.

2. Зафиксированное проседание в 2009г присыпки тетраэдных блоков у основания головки южного мола вызвало резкое изменение морфометрических параметров депрессии о чем свидетельствует резкое увеличение объема депрессии в период с 2010г по 2014г (рис16). Видимо, после реконструкции молв в 2006г [4] происходил интенсивный подмыв основания южного мола вдольбереговыми течениями, что привело к проседанию присыпки южного мола и стало причиной резкого скачка максимально глубины примоловой вершины в 2011г.

3. С момента реконструкции депрессия не достигла состояния равновесия, очертания контуров практически не изменяются, за исключением очертаний контуров «языков наносов» у конечностей северного и южного молв. Объем и максимальная глубина депрессии с каждым годом увеличиваются.

4. Результаты анализа данных наблюдений показали, что основные изменения очертаний и глубины депрессии происходит у оголовка южного мола, что является достаточным аргументом в пользу заключения о результирующем транспорте донных наносов направленного с севера на юг, что соответствует [15], но противоречит [10].

5. В ходе моделирования удалось воссоздать только процесс миграции кромки депрессии в области охвата северного мола «языком наносов». Под

действием экстремального западного ветра происходит сглаживание «языка наносов», что частично совпадает с данными наблюдений.

6. Параллельно поставленным задачам, при расчете деформации дна был воссоздан процесс заносимости фарватера Морского канала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 1 Балтийское море. Вып 3. Куршский и Вислинский заливы. – Л., Гидрометиздат, 1971, с. 6-120.
2. Гидрометеорологический режим Вислинского залива. /Под ред. Н.Н. Лазаренко и А. Маевского. – Л., Гидрометиздат, 1971, с. 6 -120.
3. Басс О.В. Оценка взаимодействия природных и техногенных процессов в ходе строительства и эксплуатации порта Балтийск и гавани Пионерской / О.В.Басс // Тезисы докладов на 1 международной конференции: Актуальные вопросы мониторинга геологической среды и безопасности урбанизированных территорий, Калининград : БФУ им И. Канта, 2013 г. – с 42
4. Давыденко Л. Калининградский морской канал.; Калининградиздат - Калининград, 2006.
5. Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л. и др. О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала: Водные ресурсы, Калининград 2008, т35, №6, с. 1-11
6. Чечко В.А. Процессы современного осадкообразования в Вислинском заливе Балтийского моря: автореф. дисс. на соиск. учен.степ. канд. геол. минер. наук. (25.00.28) / Чечко Владимир Андреевич; ИО РАН. – Калининград, 2006
7. Болдырев В.Л., Бобыкина В.П., Чубаренко Б.В. и др., Абразионные процессы на берегах Юго-Восточной Балтики. [статья] / В.Л. Болдырев, В.П.Бобыкина, Чубаренко Б.В. и др. // ИО РАН. – Калининград, 2007г.
8. Математическое моделирование изменения гидрологического режима акватории Калининградского морского канала при строительстве Морского терминала Светловской теплоэлектростанции: отчет о НИР ООО

«Кардинал софт» (2016г.) / К.А.Клеванный, Е.В. Смирнова, М.К. Клеванная; рук.темы К.А. Клеванный. – Санкт-Петербург: ООО «Кардинал софт», 11 января 2016. – арх. №43

9. Математическое моделирование экстремальных скоростей, уровня, волнения и деформаций дна в Невской губе в районе строительства многофункционального общественно-делового комплекса «Лахта-центр»: отчет 2016г / К.А.Клеванный – Санкт – Петербург: ООО «Кардинал софт» 2016г.

10. Chubarenko B., Babakov A., Sediment transport near the vistula spit (Baltic sea)/B. Chubarenko,A.Babakov // Atlantic Branch of P.P.Shirshov Institute of Oceanology of Russina Academy of Sciences–Kaliningrad, 2016

11. Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В. Сравнение средних и экстремальных уровней в Балтийском проливе и устье реки Преголи (Вислинский залив) за период 1901 – 2006 гг./С.Е. Навроцкая, Б.В. Чубаренко // В сб.: XIV съезд Российского географического общества, СПб, Ноябрь 2010г.

12. Бобыкина В.П., Стонт Ж.И. О зимней штормовой активности и 2011-2012гг и ее последствиях для побережья Юго-восточной Балтики [статья]/ В.П. Бобыкина, Ж.И. Стонт // Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова. – Калининград, 2013г

13. Стонт Ж.И., Демидов А.Н. Изменчивость температуры воздуха над акваторией Юго-Восточной Балтики по данным МЛСП D-6 (2004-2013) [статья] / Ж.И.Стонт, А.Н. Демидов // ИО РАН. – Калининград, 2013г.

14. Jesse E., John T., Thomas G. THE FATE OF ARTIFACTS IN AN ENERGETIC, SHALLOW-WATER ENVIRONMENT: SCOUR AND BURIAL AT THE WRECK SITE OF QUEEN ANNE'S REVENGE / E. Jesse, T. John, G. Thomas // SOUTHEASTERN GEOLOGY V. 40, No. 1, February 2001, p. 19-27

15. О.В.Басс Эволюция взаимодействия природных и техногенных процессов в ходе строительства порта Балтийск [статья]// Басс О.В. - Вестник РГУ им.И. Канта (выпуск 7) 2007г - Калининград 2007г

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Изображения депрессии и совмещенные контуры по данным за 2008-2016гг.

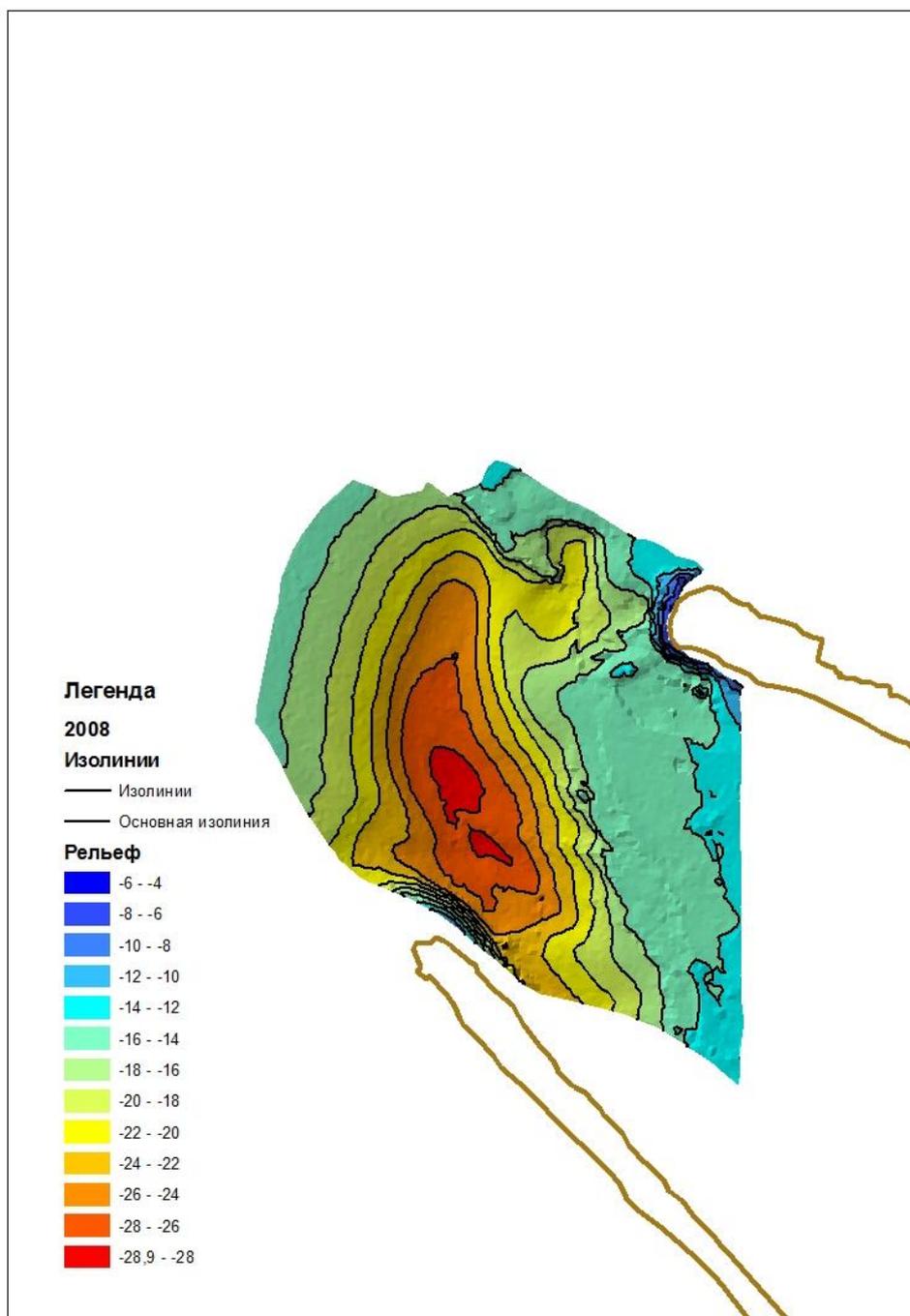


Рисунок 68 Промер 30 мая 2008 года

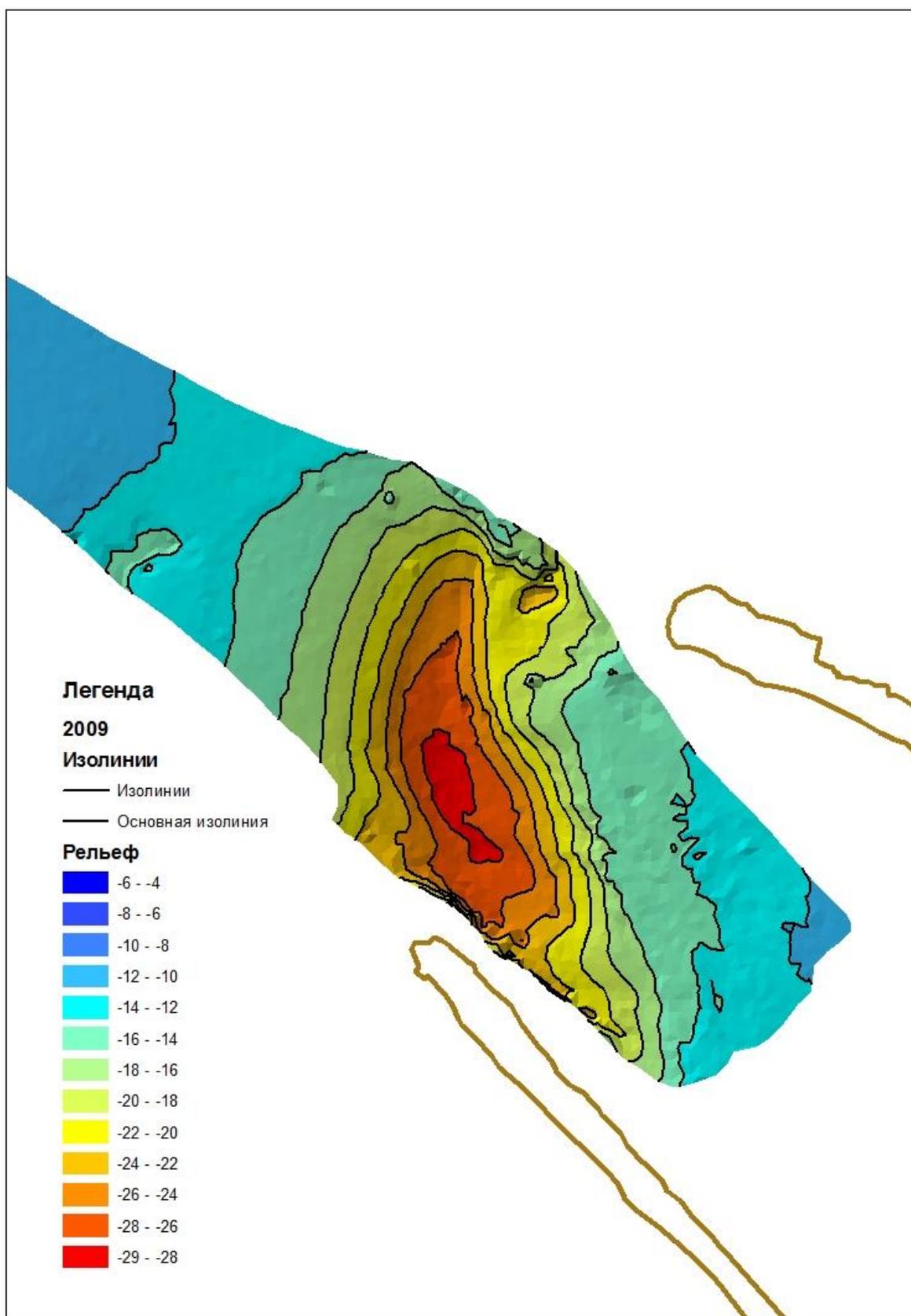


Рисунок 69 Промер 20 августа 2009 года

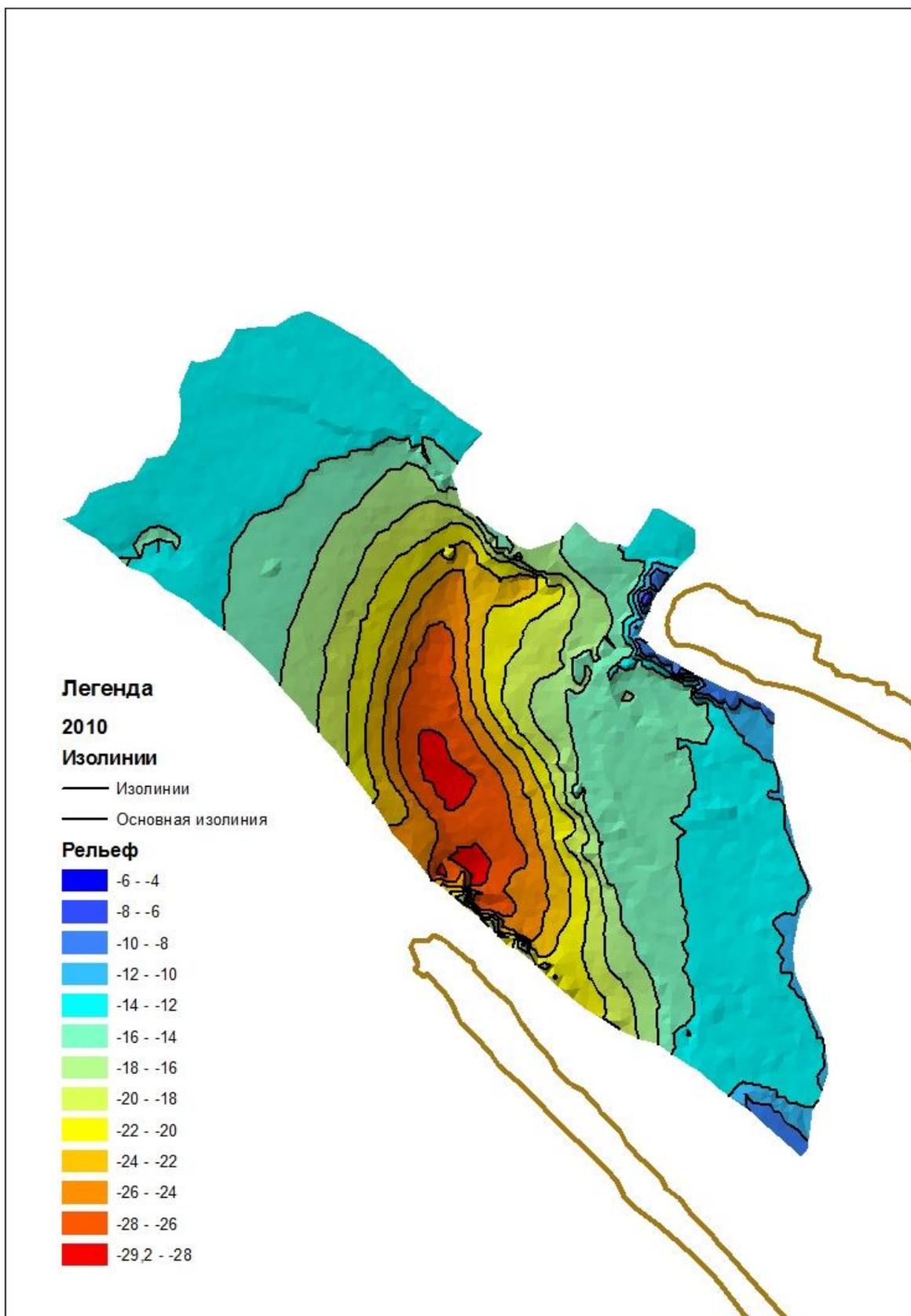


Рисунок 70 Промер 30 апреля 2010 года

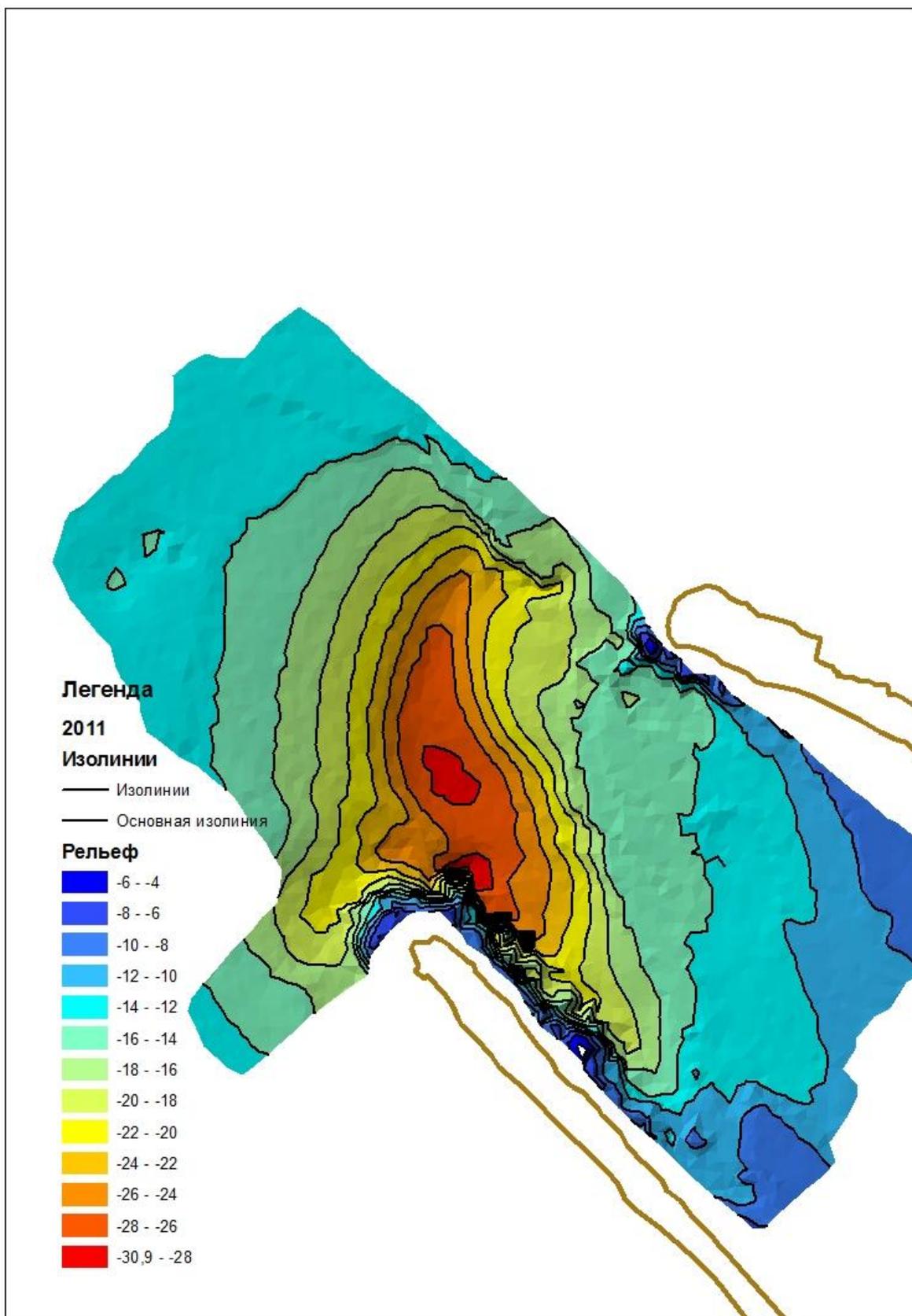


Рисунок 71 Промер 12 апреля 2011 года

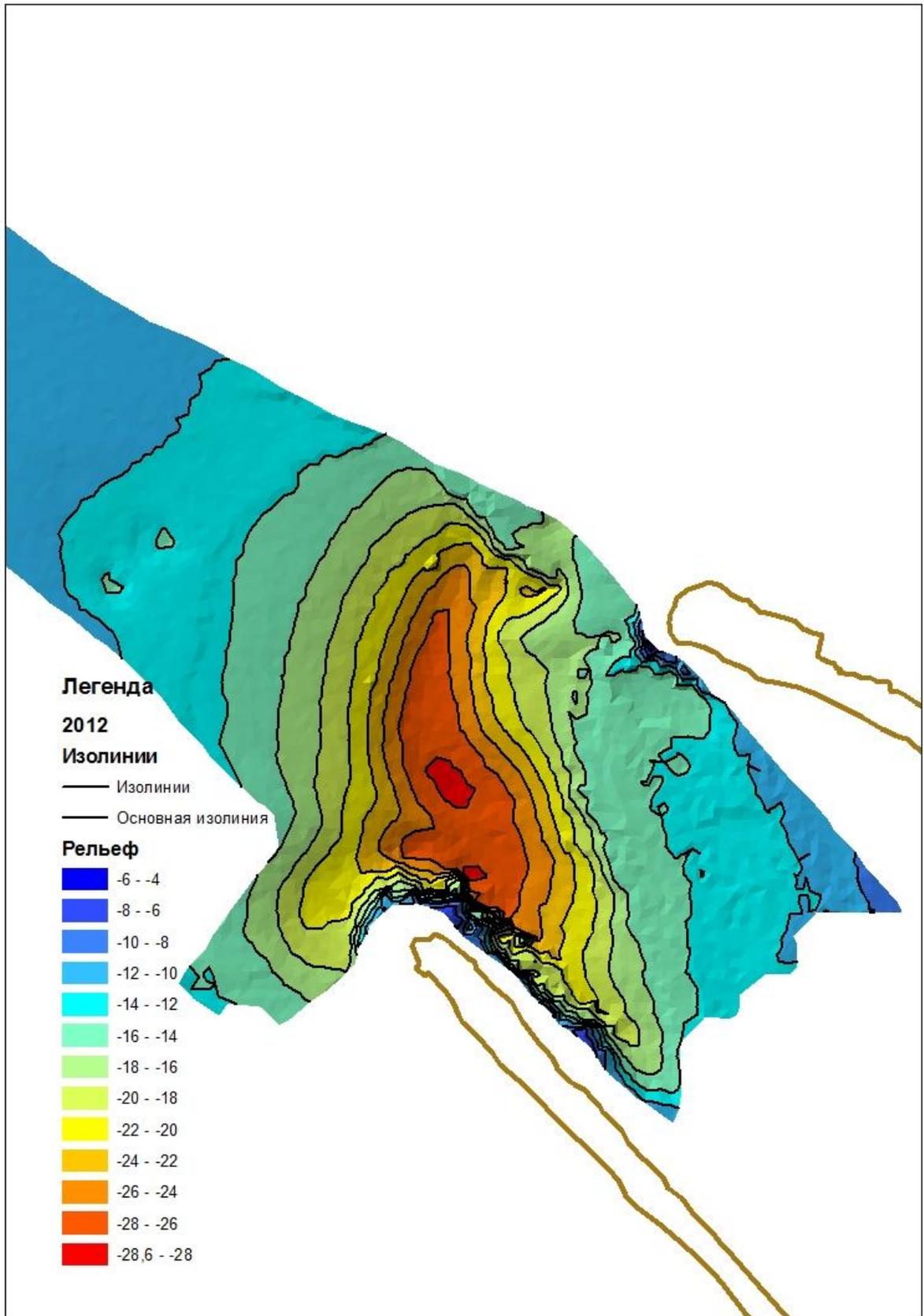


Рисунок 72 Промер 24 апреля 2012 года

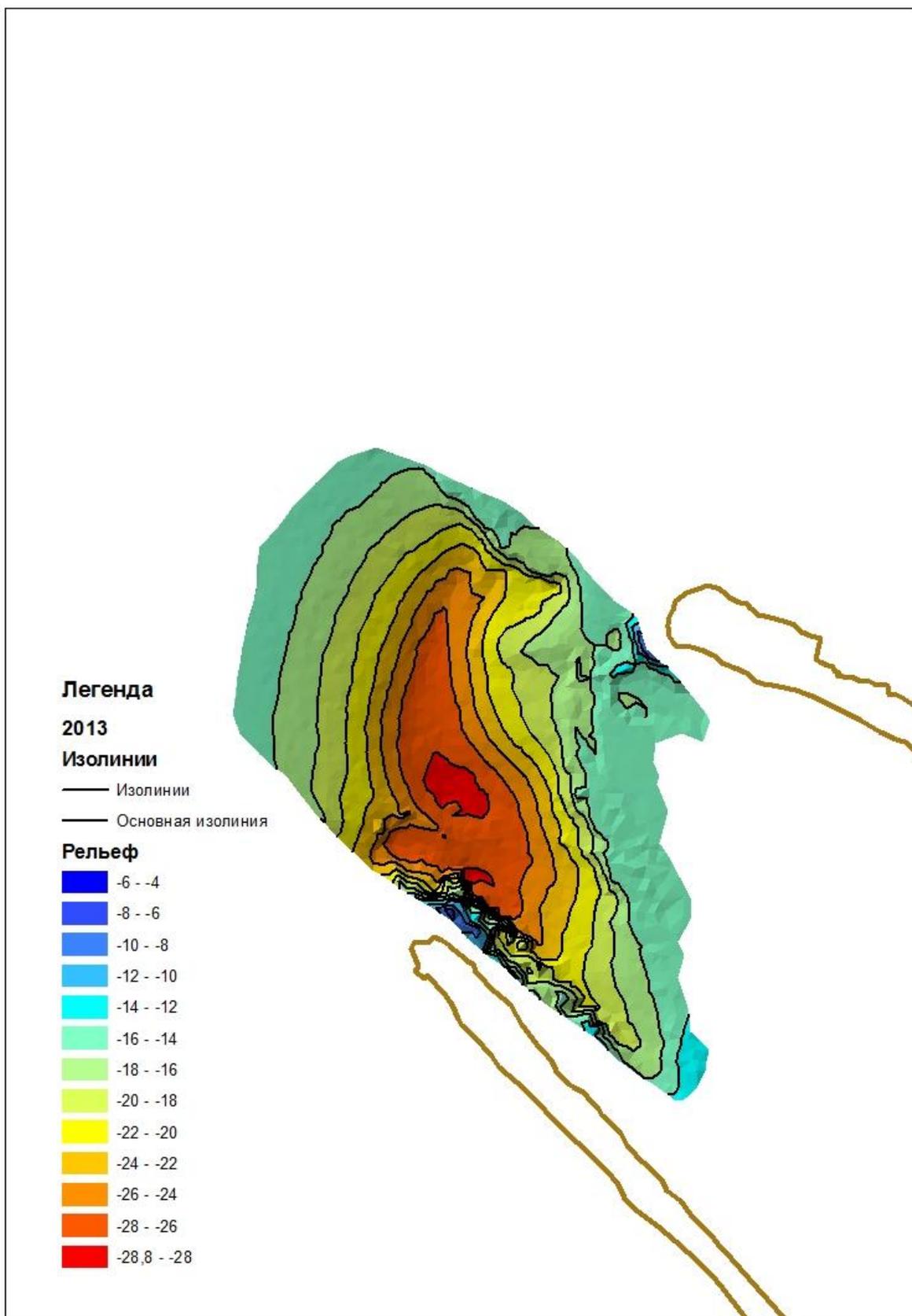


Рисунок 73 Промер 15 мая 2013 года

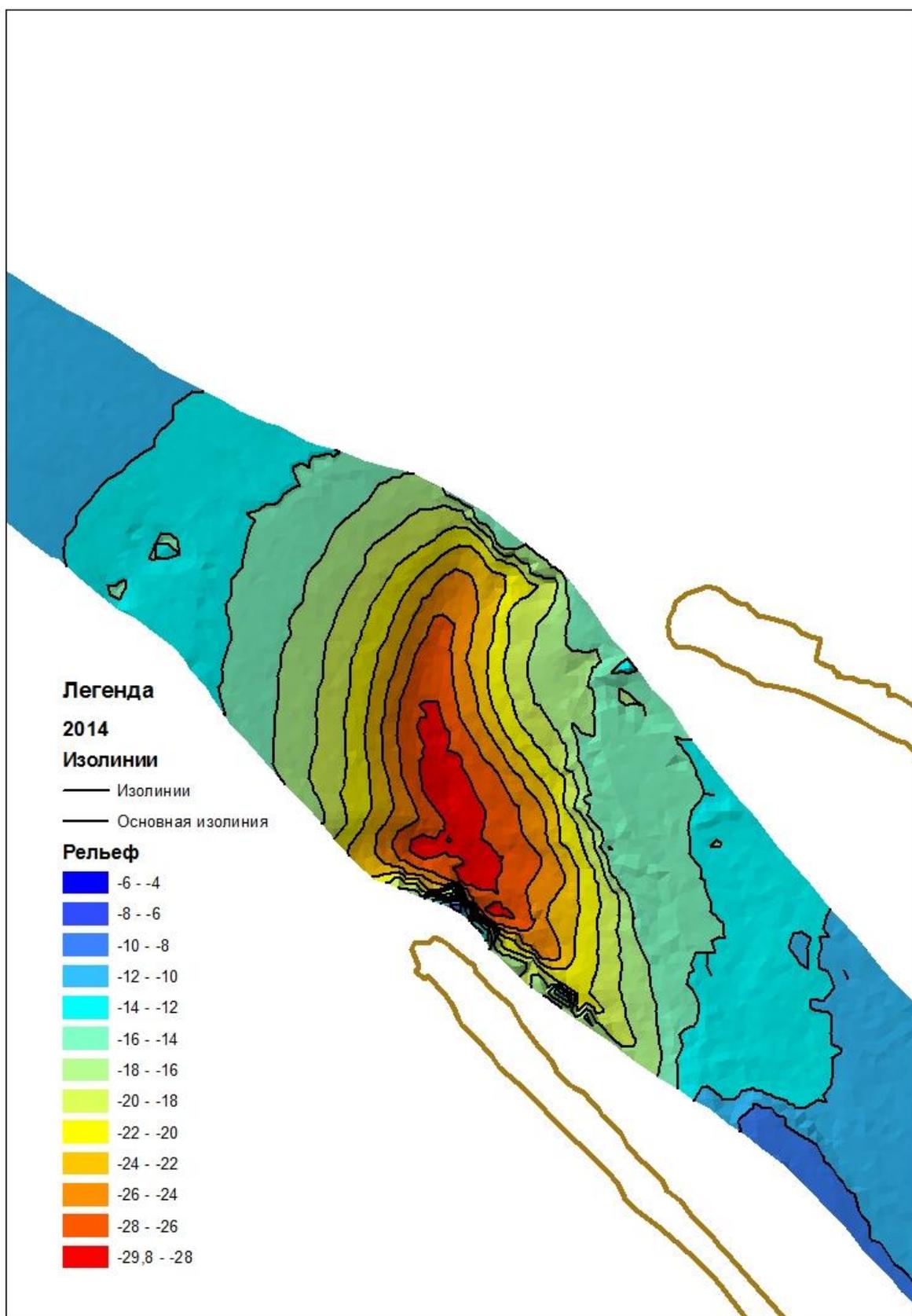


Рисунок 74 Промер 22 апреля 2014 года

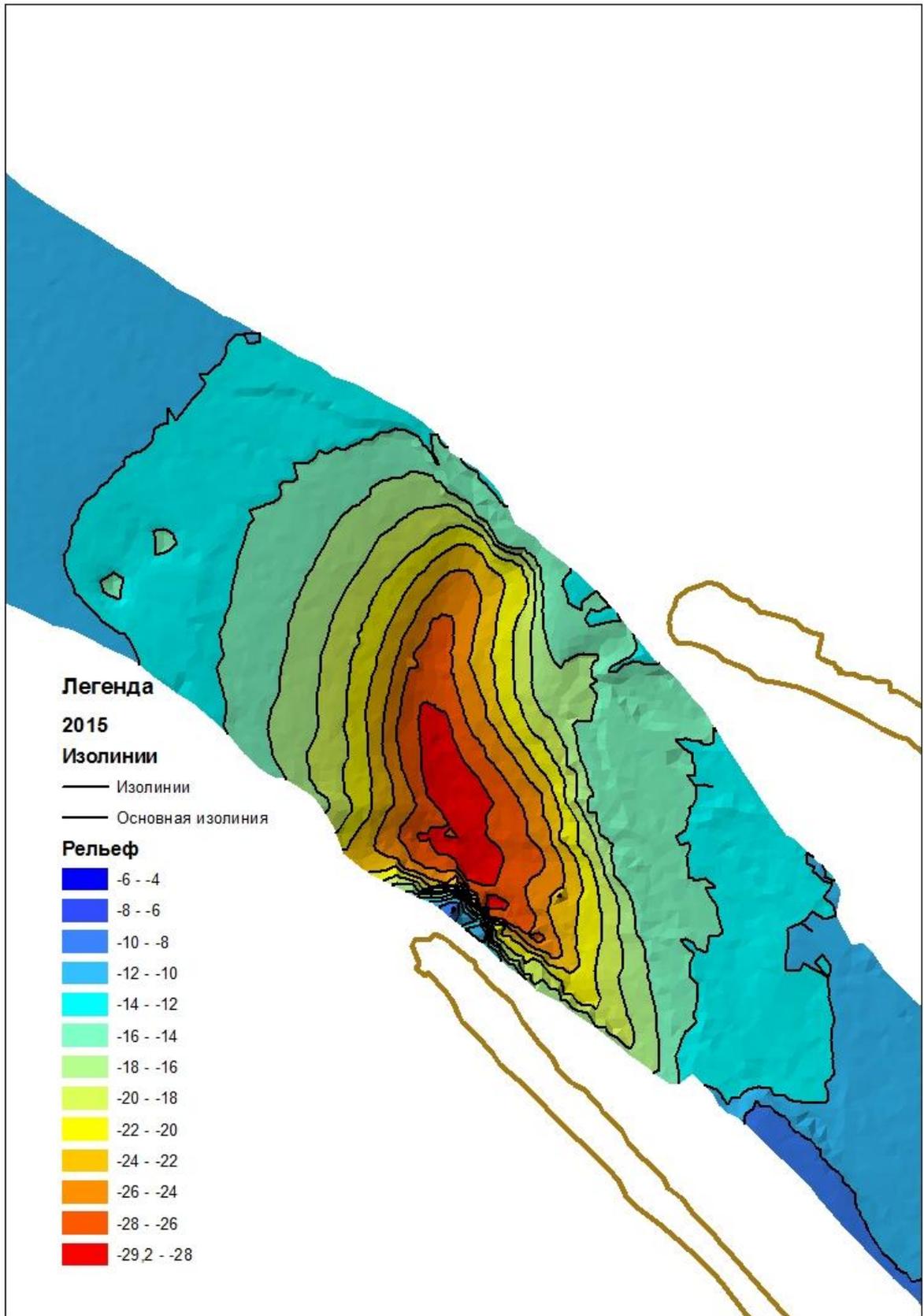


Рисунок 75 Промер 29 июня 2015 года

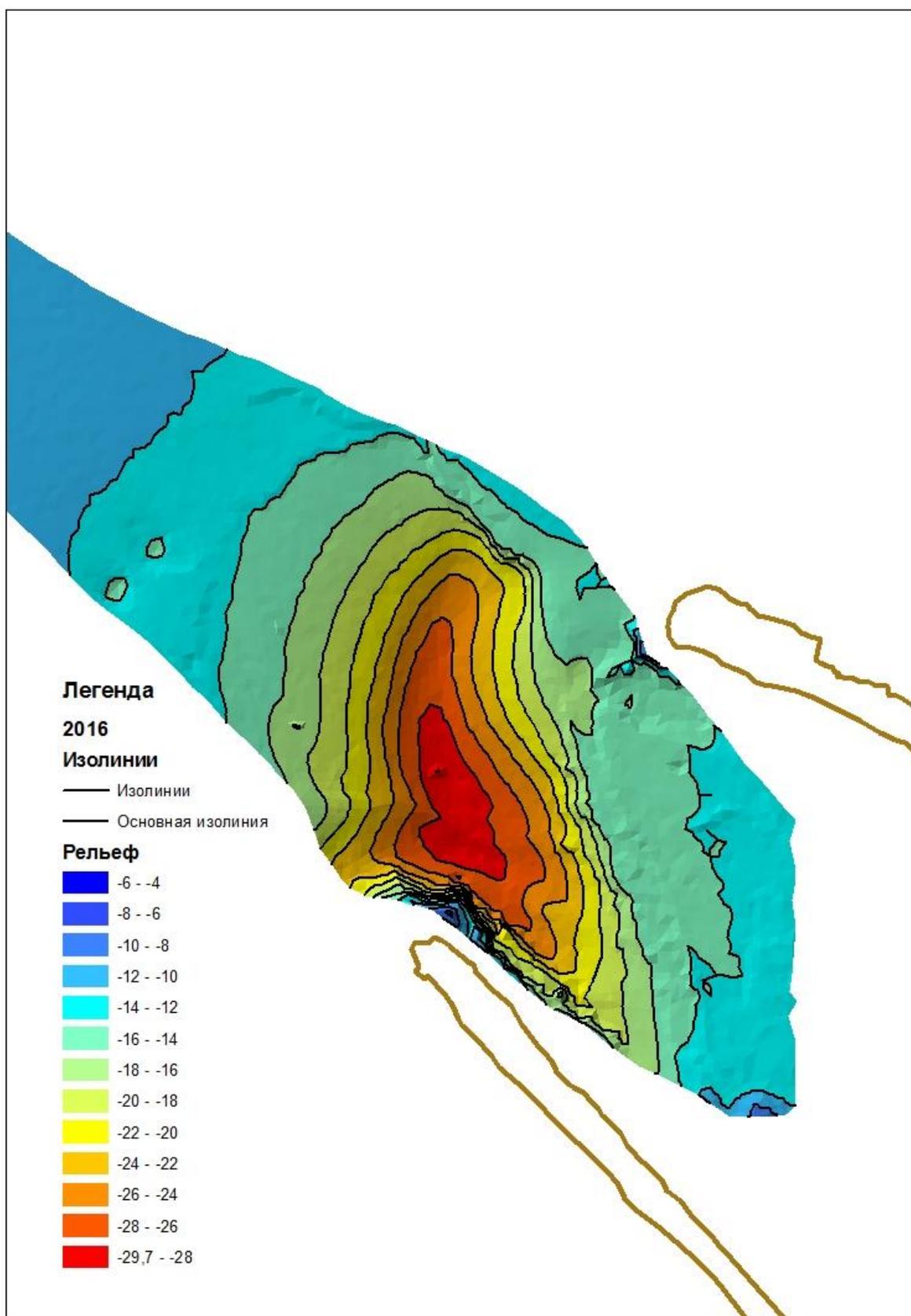
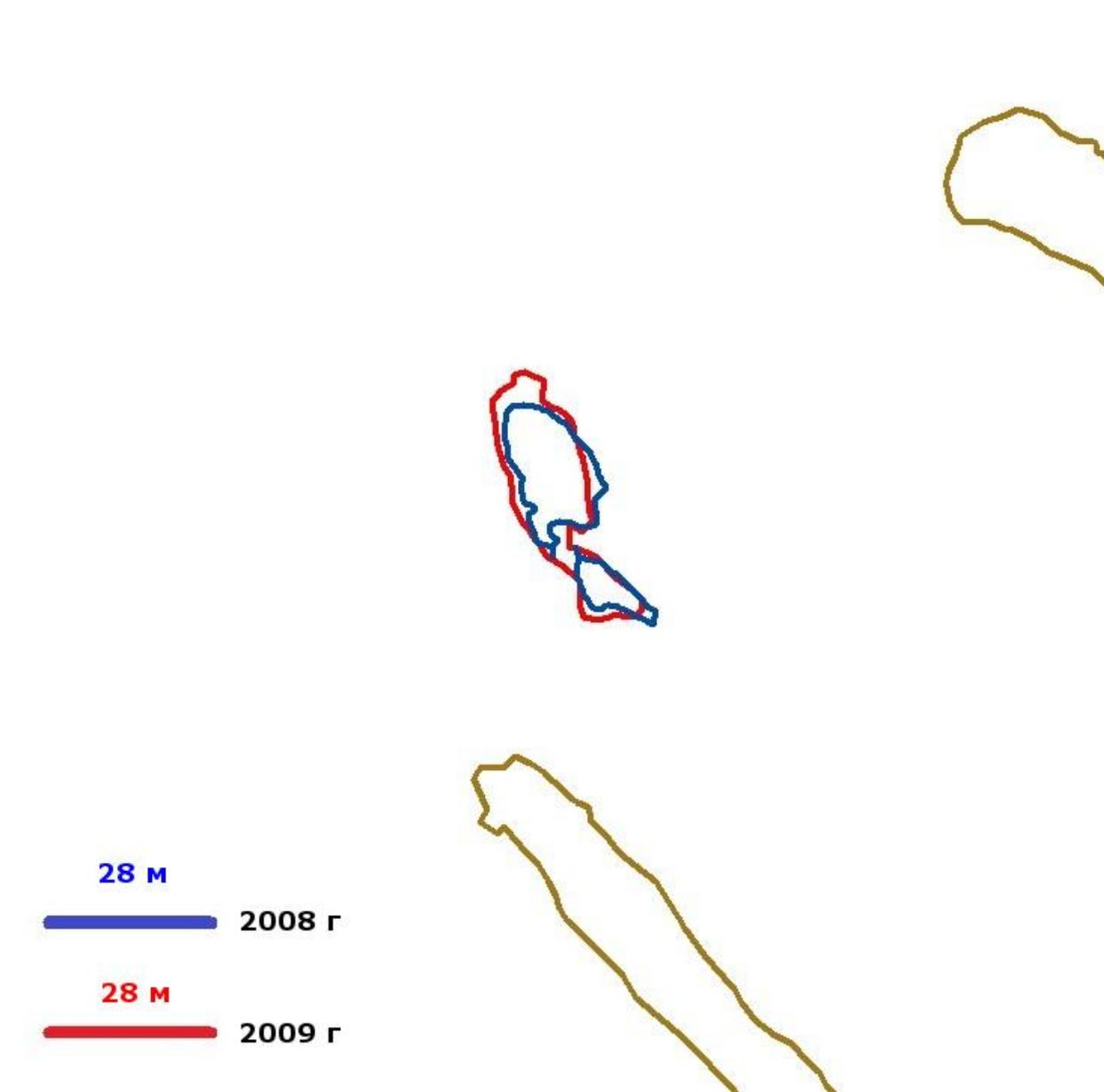


Рисунок 76 Промер 26 апреля 2016 года



**Рисунок 77 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2008-2009гг.**

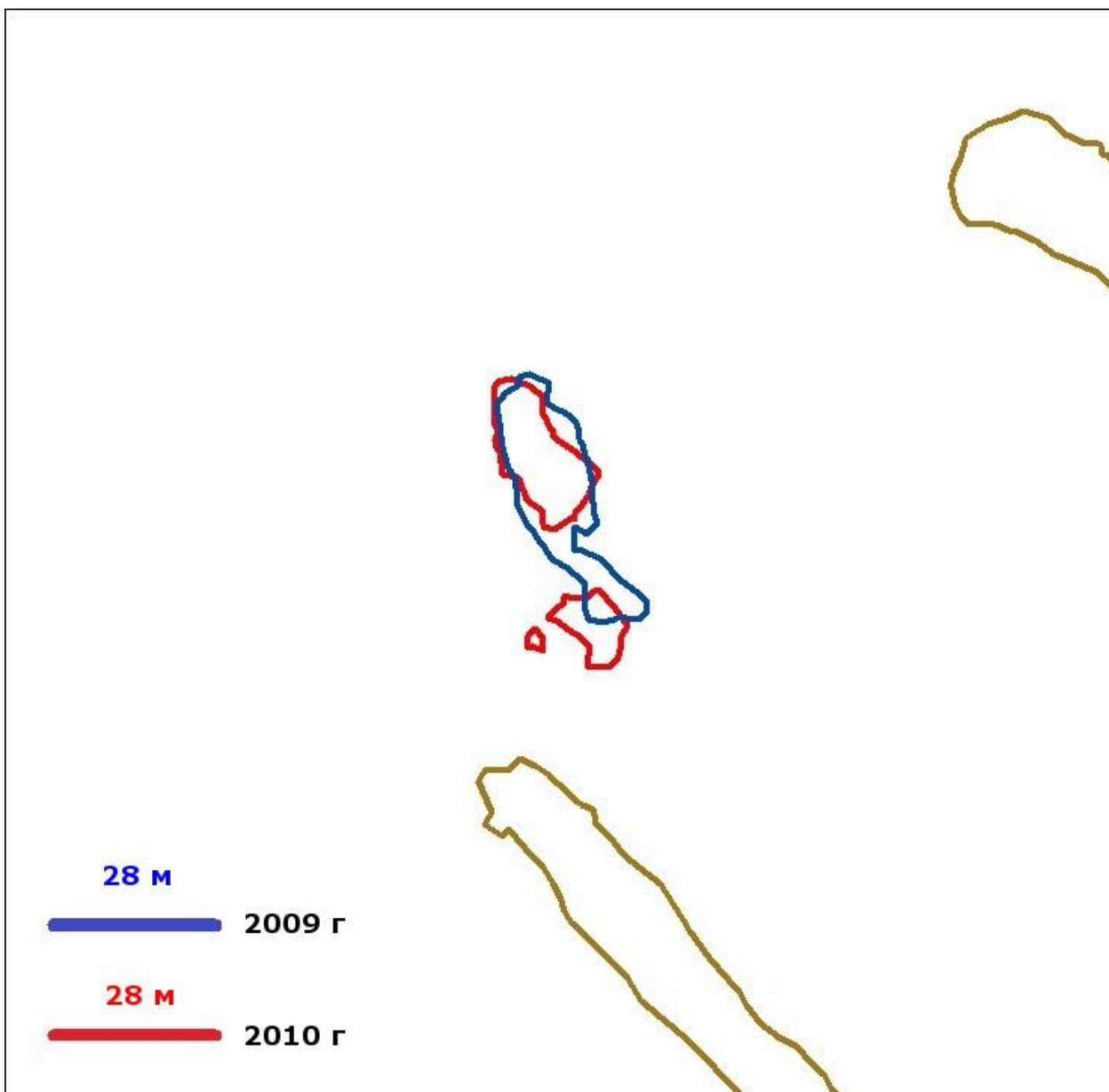


Рисунок 78 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2009-2010гг

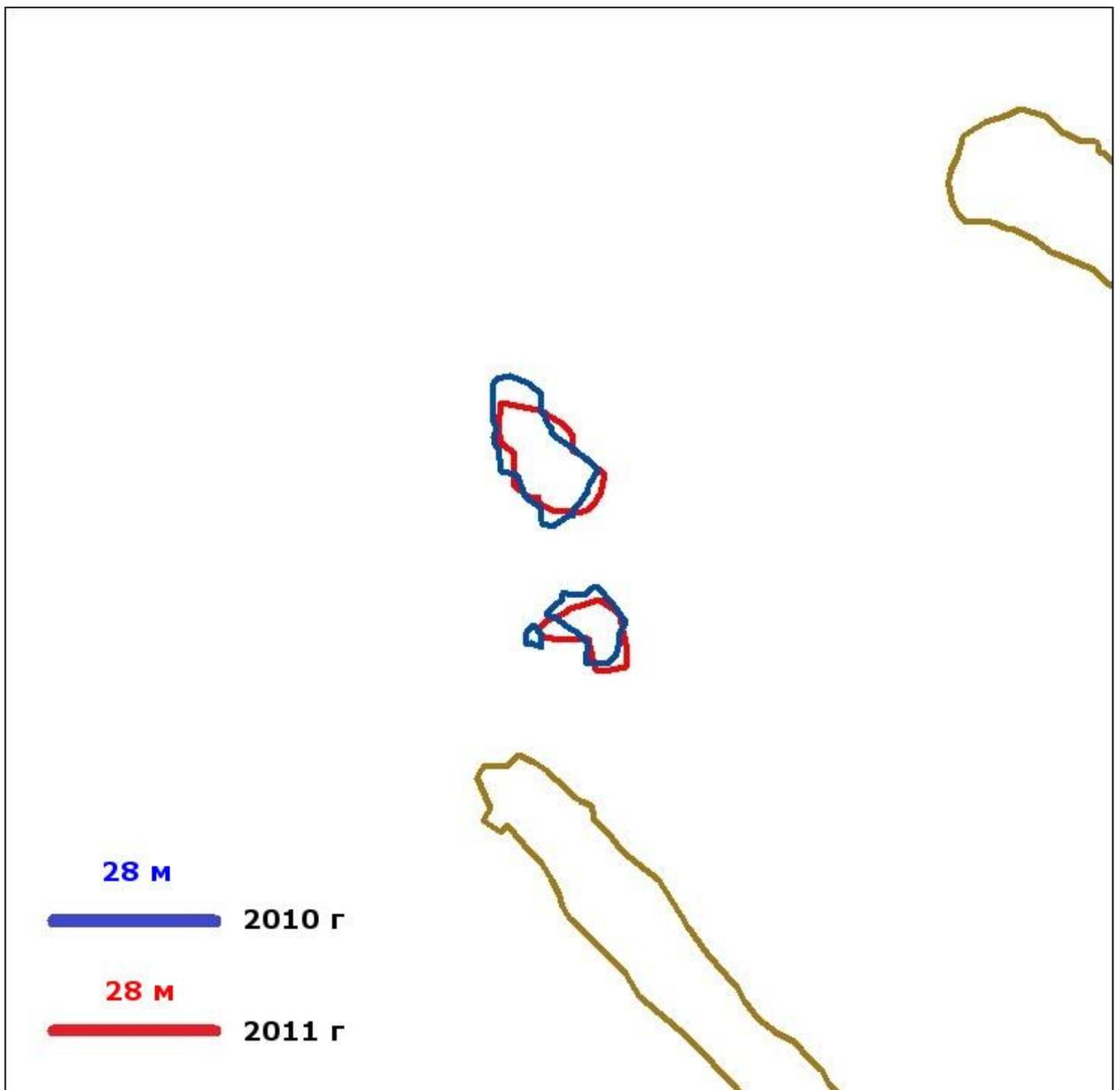


Рисунок 79 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2010-2011гг

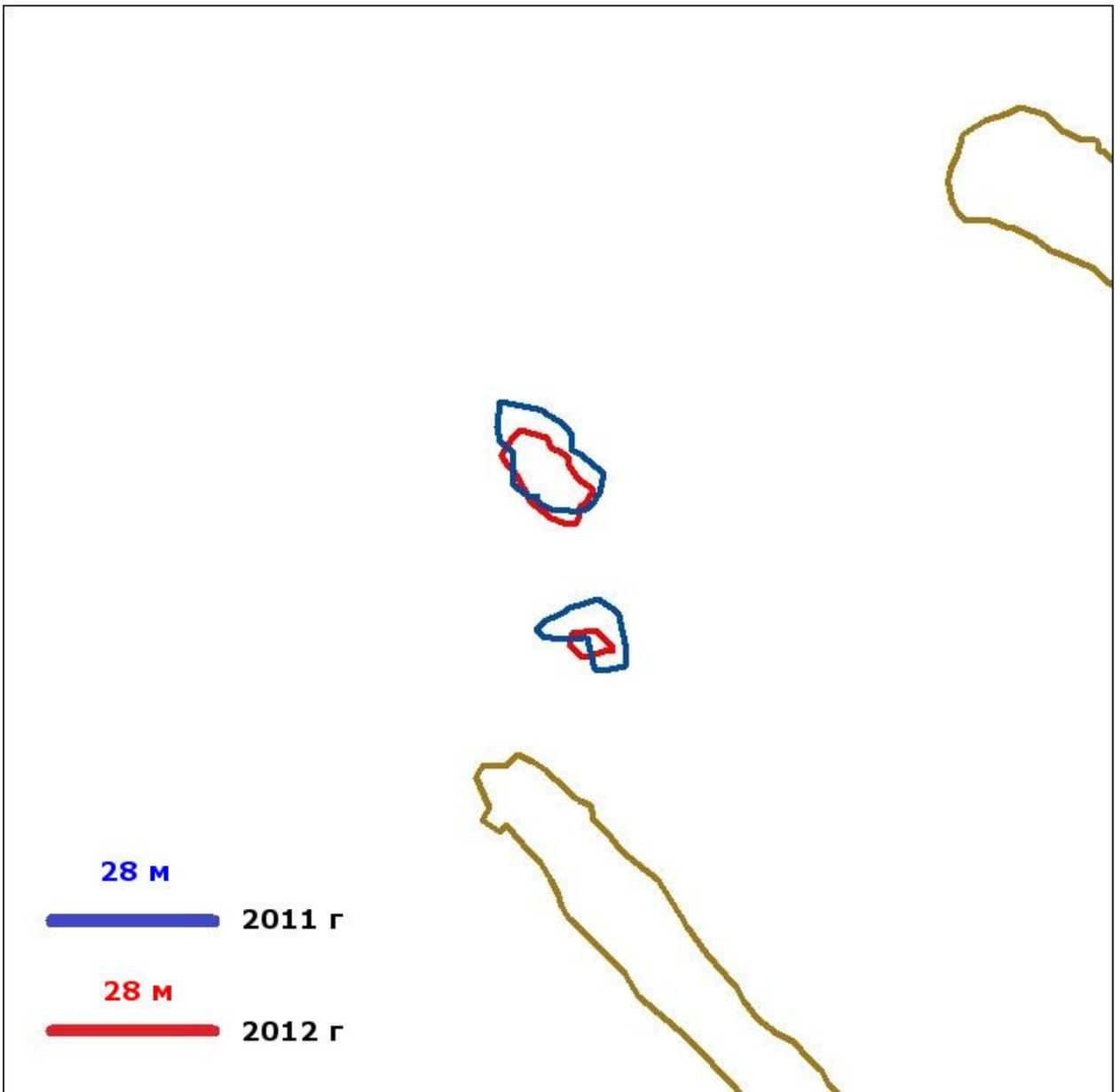


Рисунок 80 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2011-2012гг

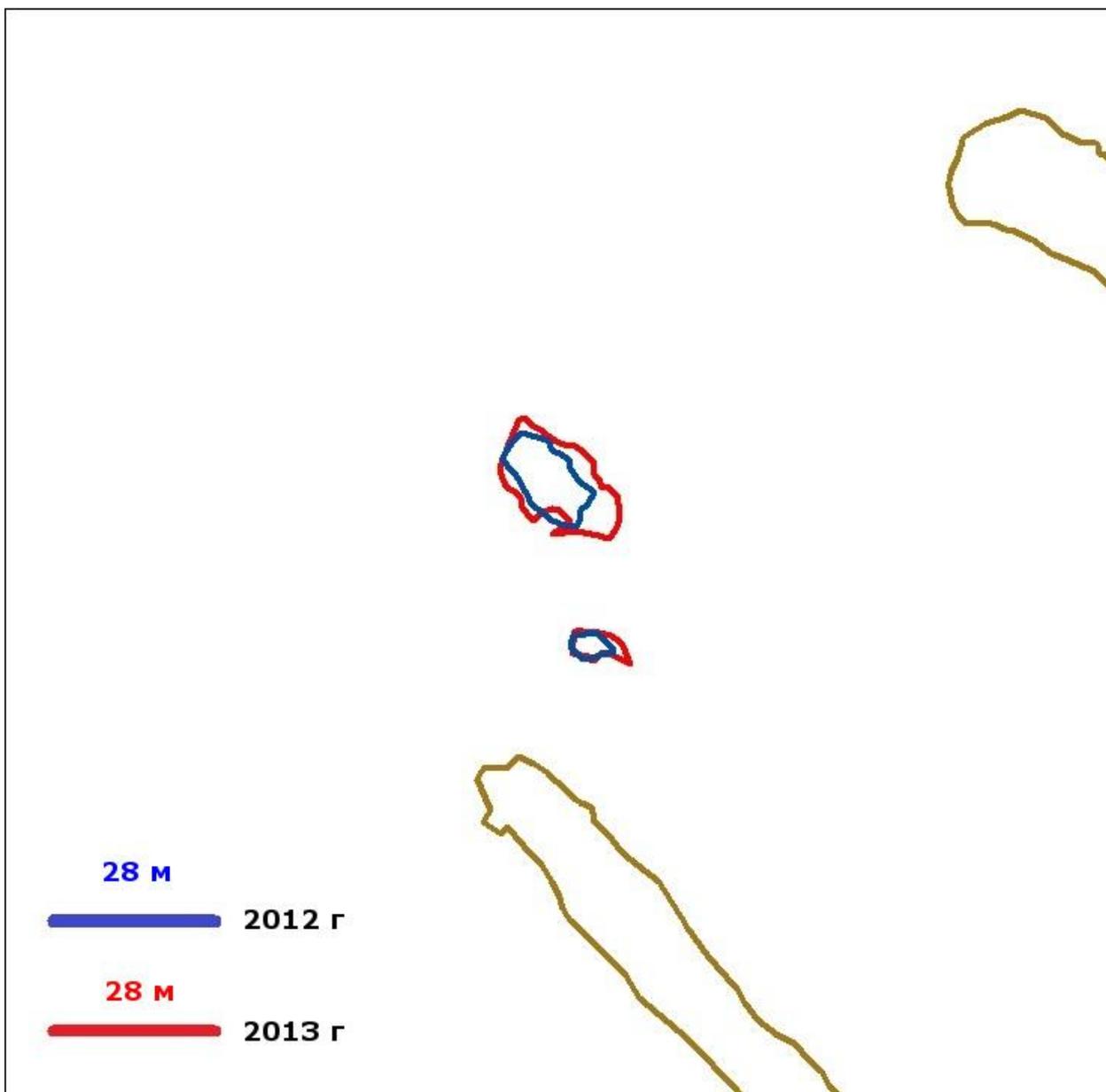


Рисунок 81 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2012-2013гг

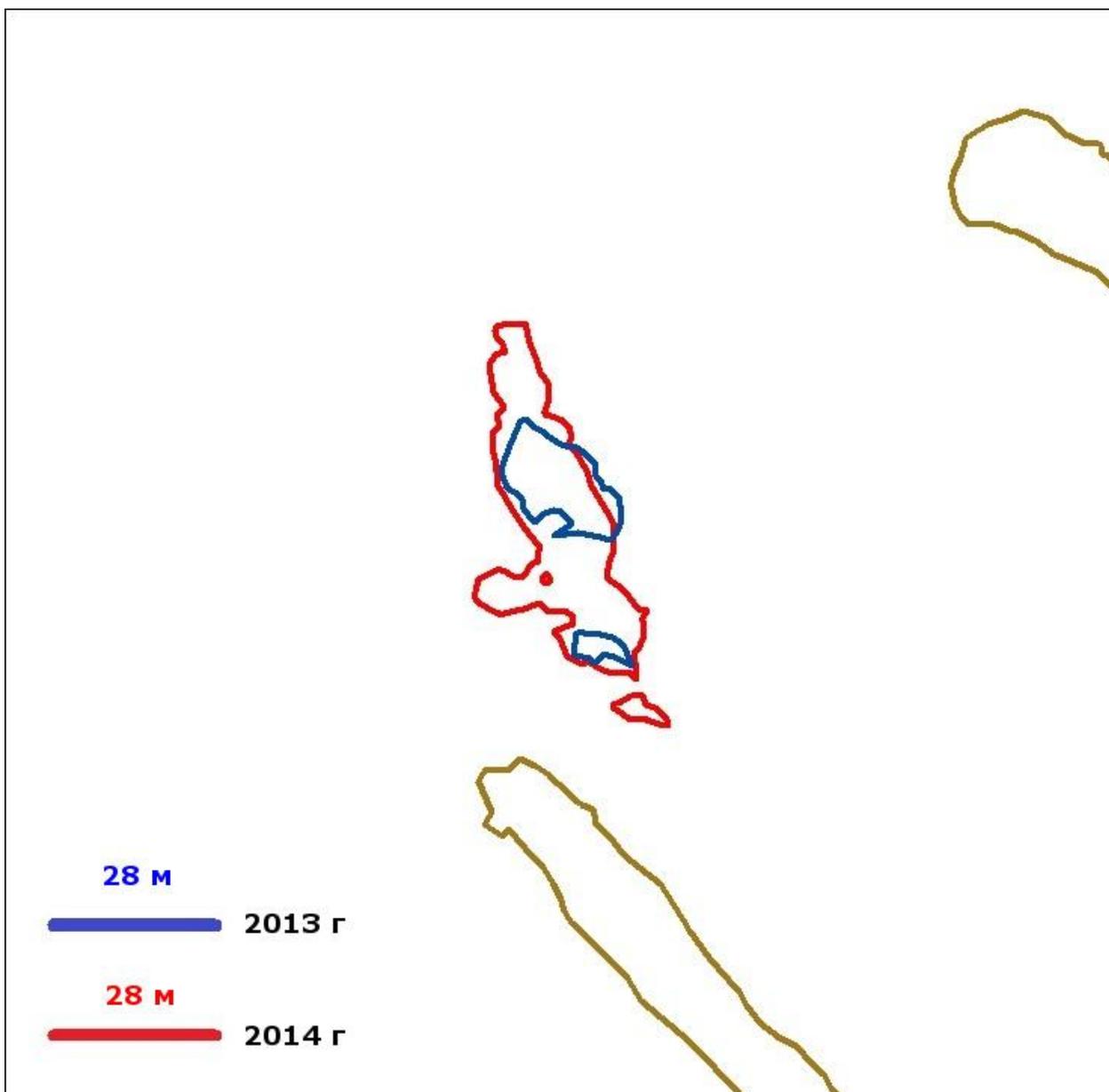


Рисунок 82 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2013-2014гг

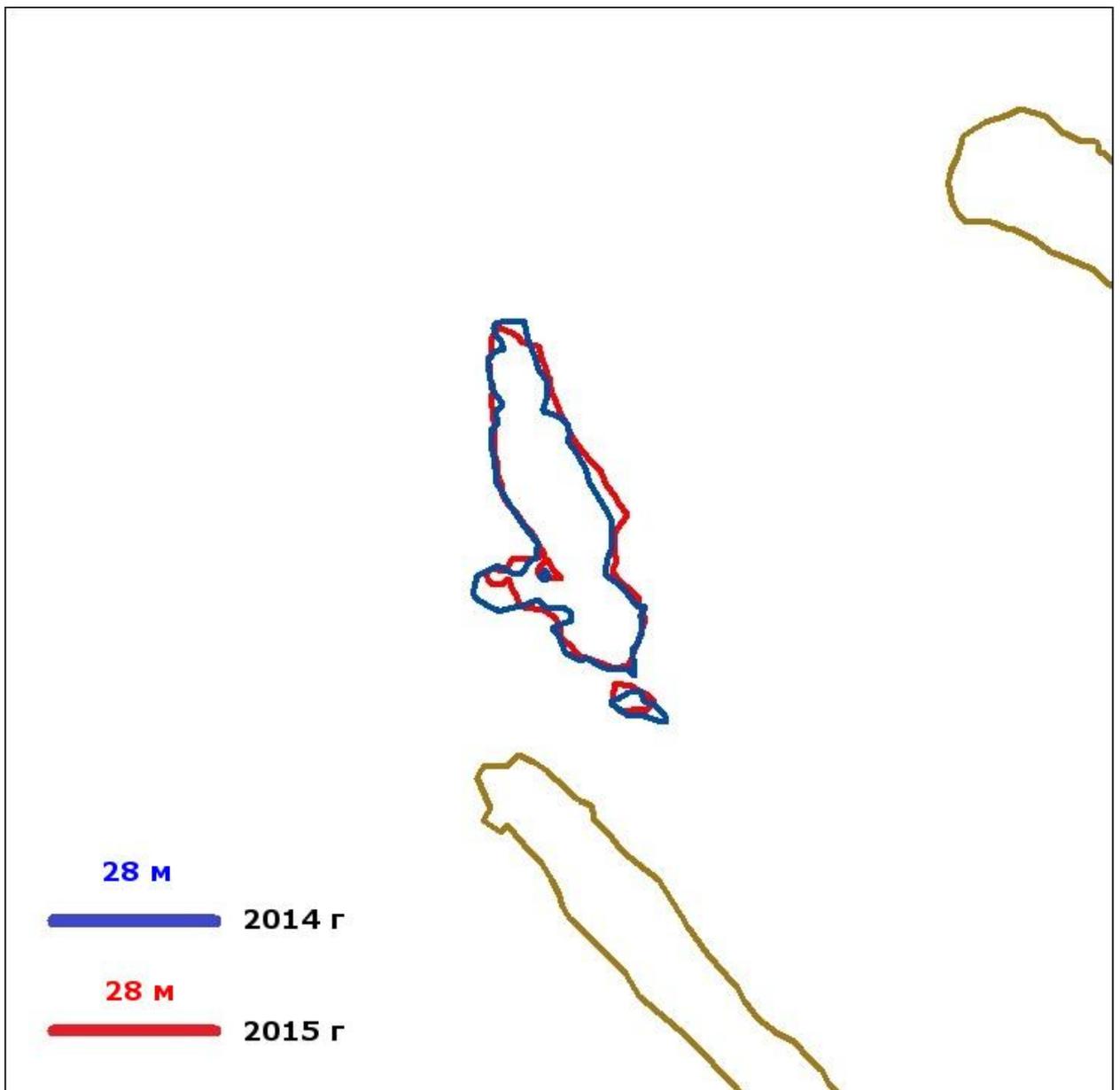


Рисунок 83 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2014-2015гг

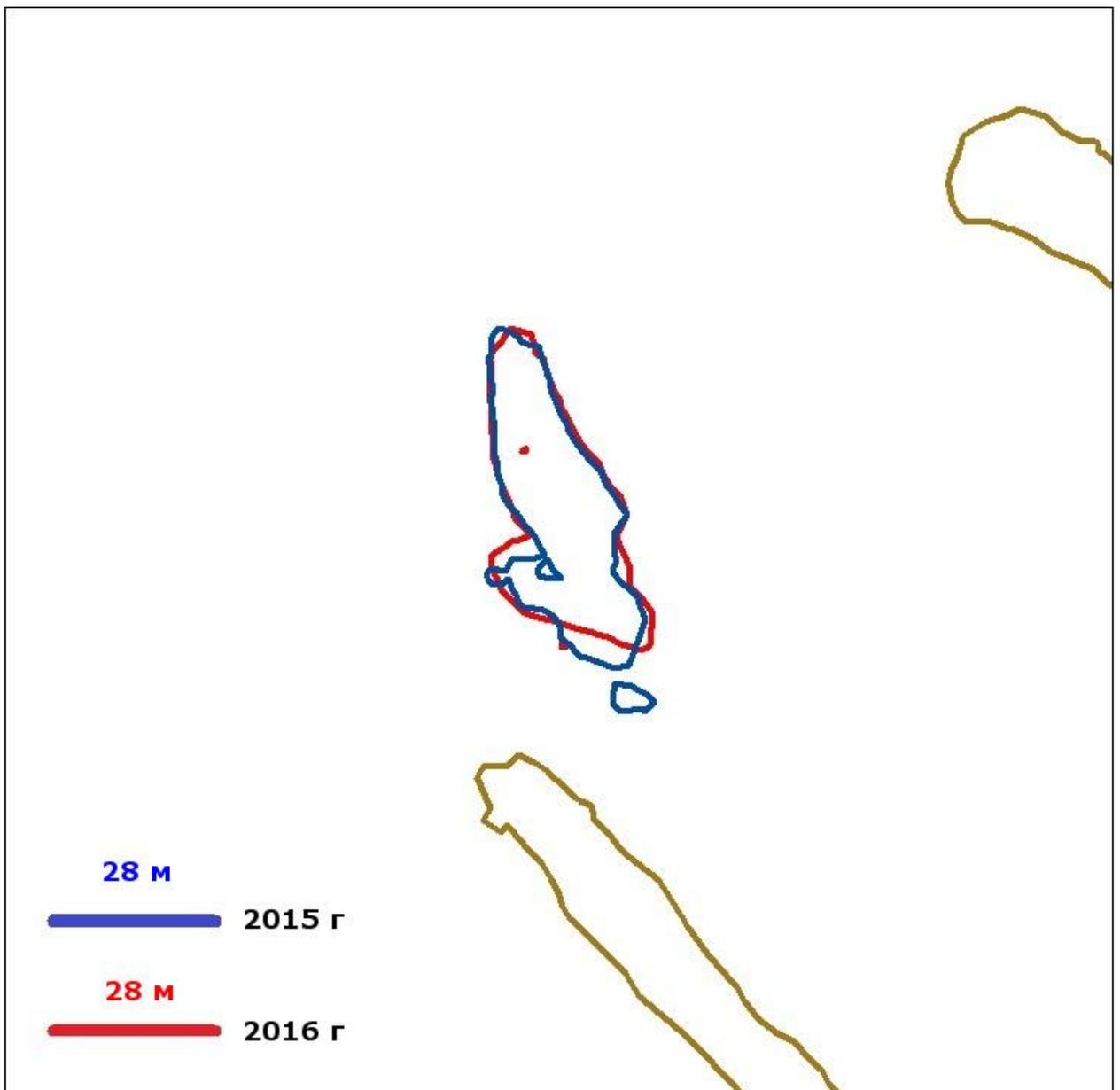


Рисунок 84 Совмещенные контуры примоловой и центральной вершин по изобате 28м по данным промеров за 2015-2016гг

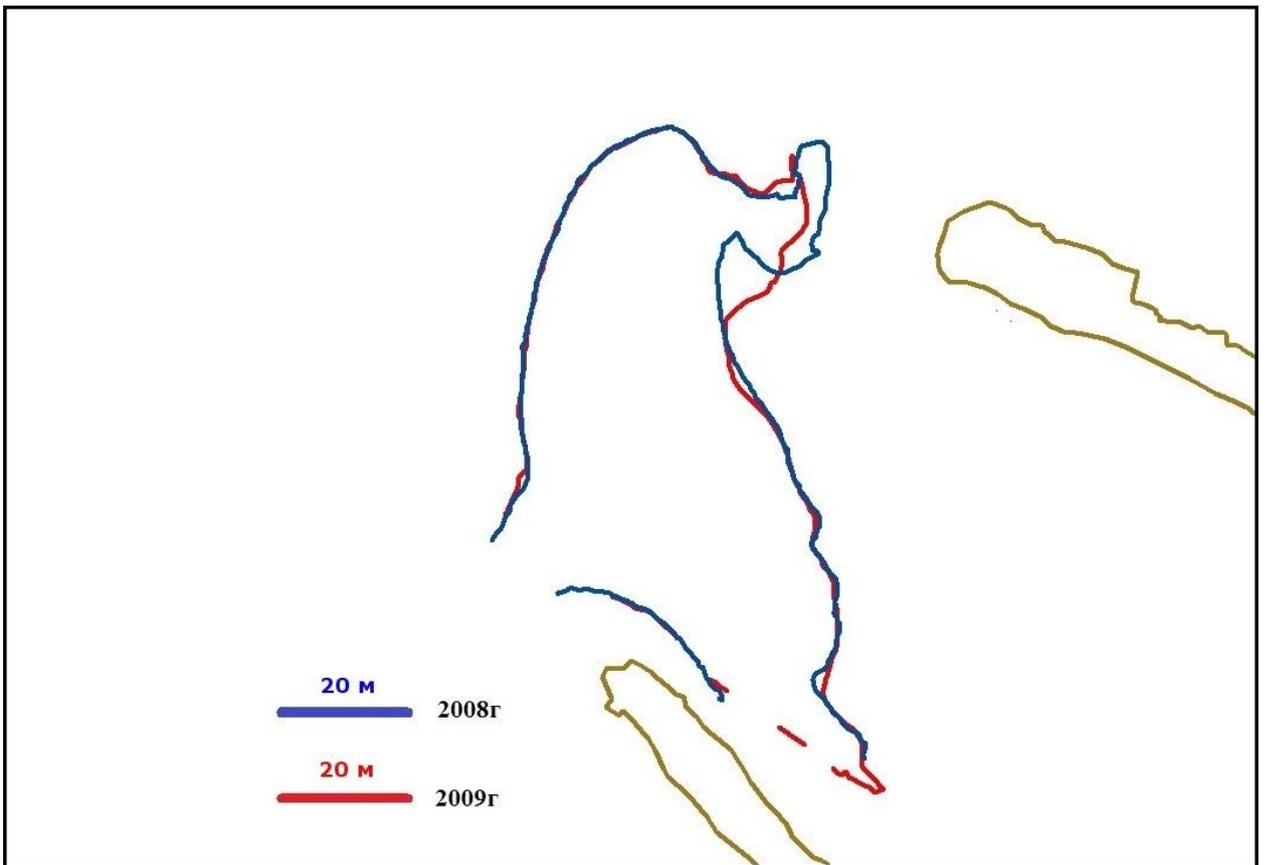


Рисунок 85 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2008-2009гг

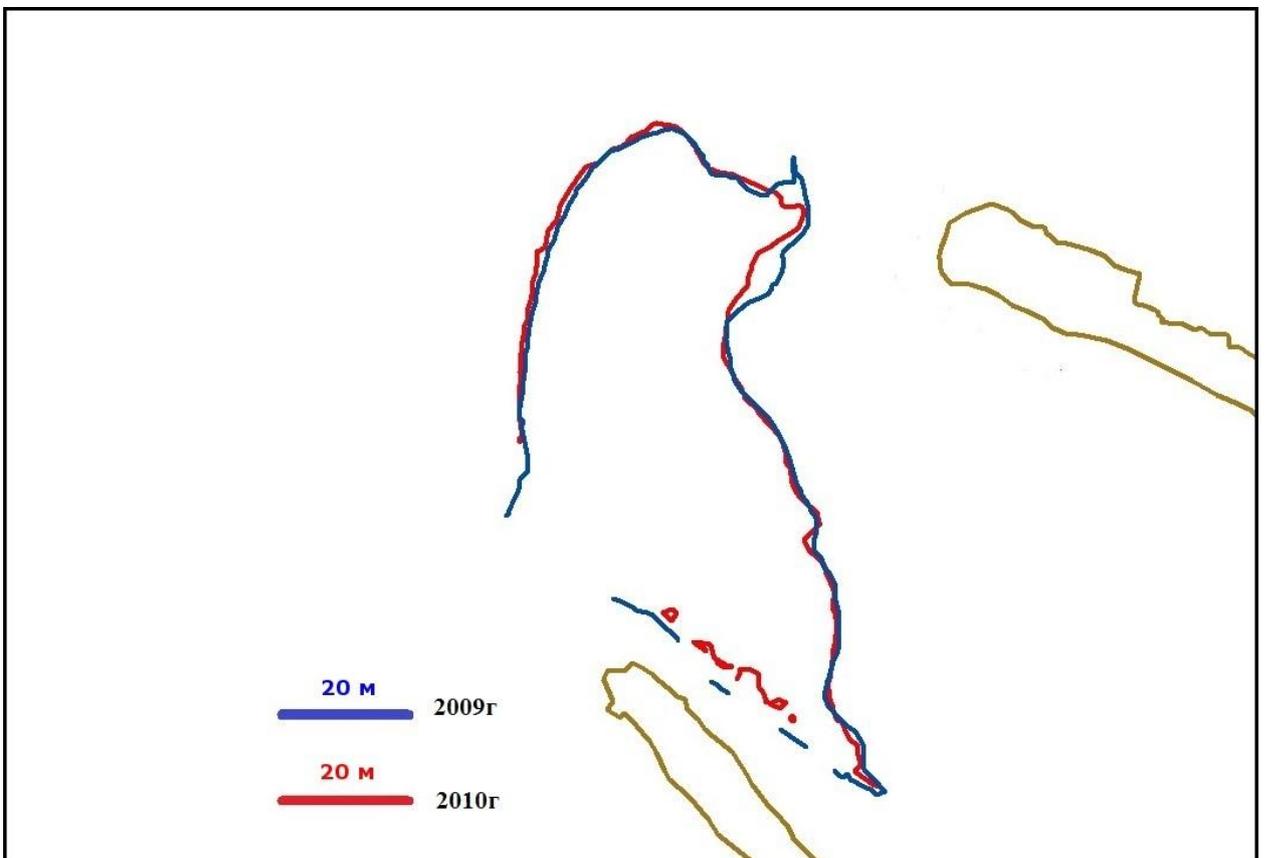


Рисунок 86 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2009-2010гг

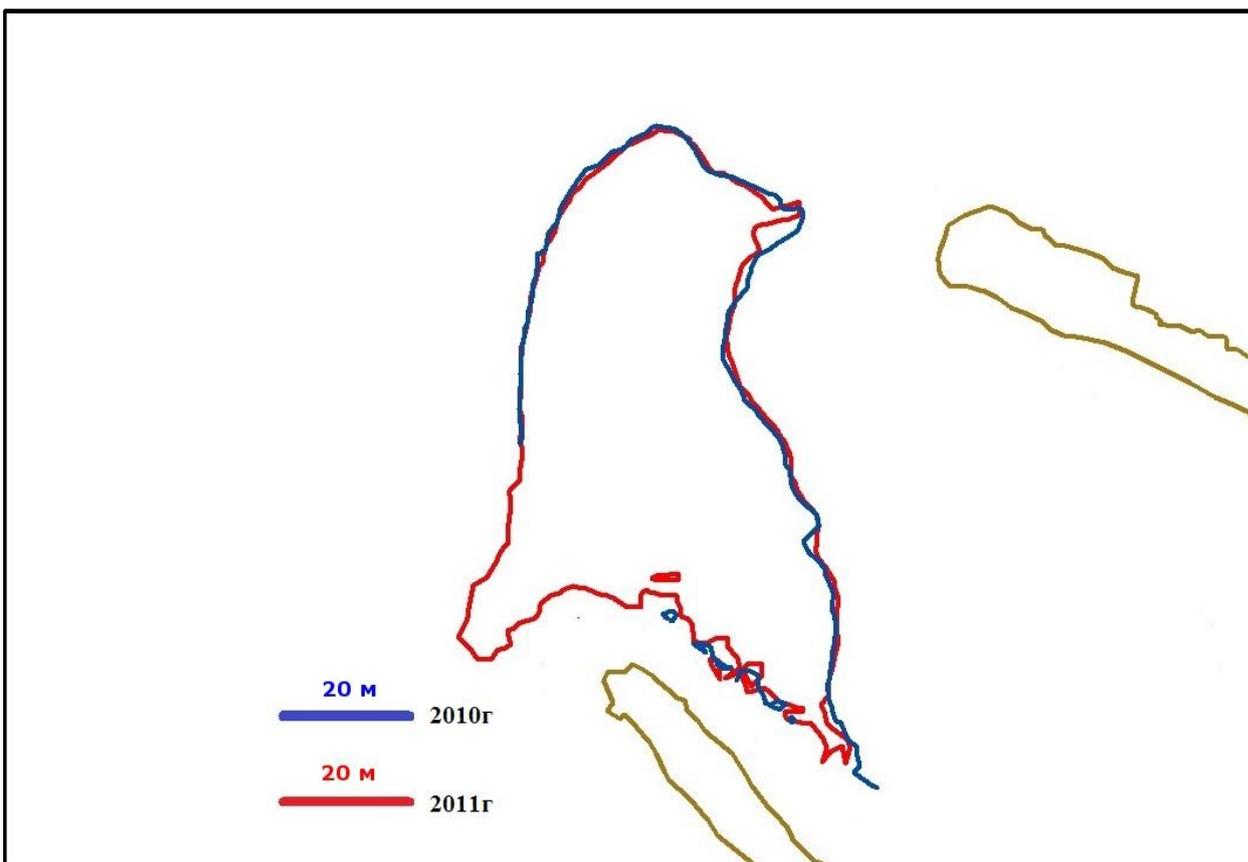


Рисунок 87 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2010-2011гг

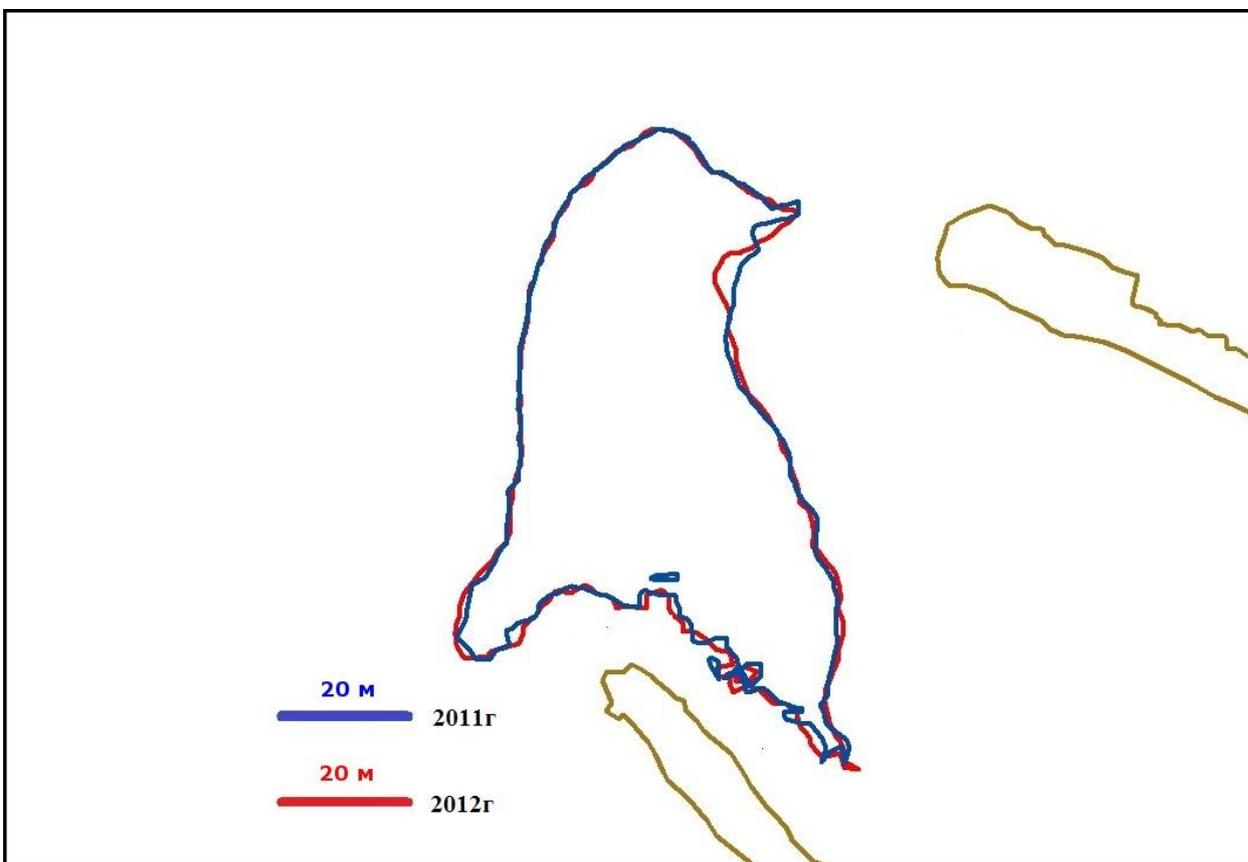


Рисунок 88 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2011-2012гг

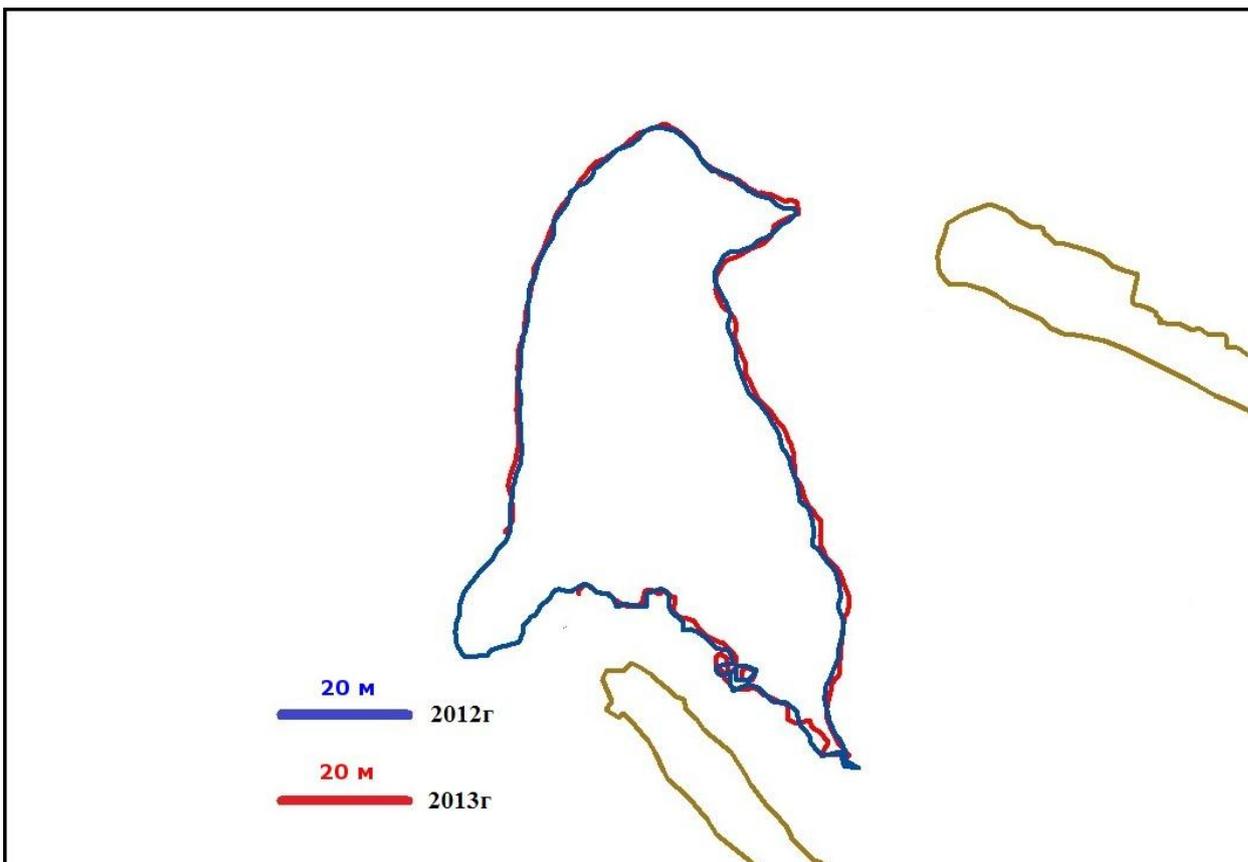


Рисунок 89 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2012-2013гг

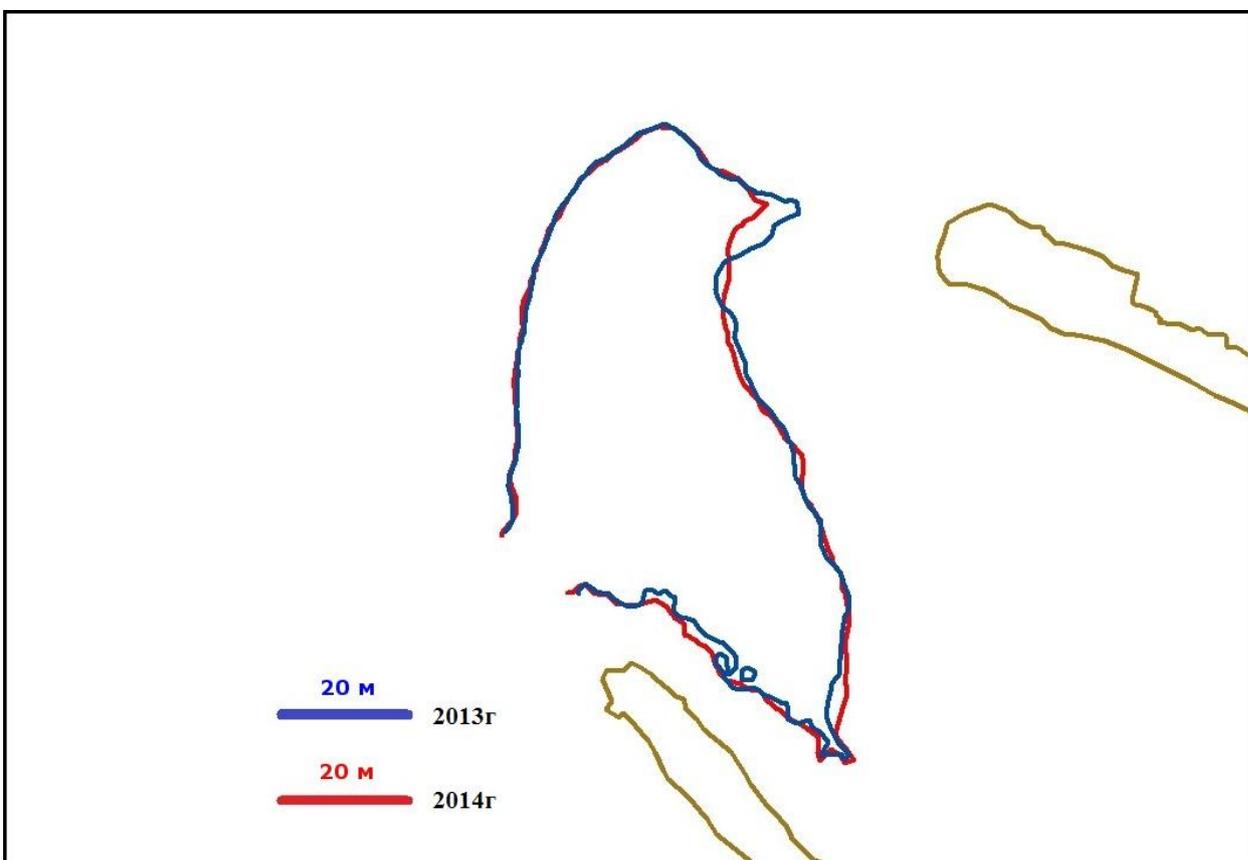
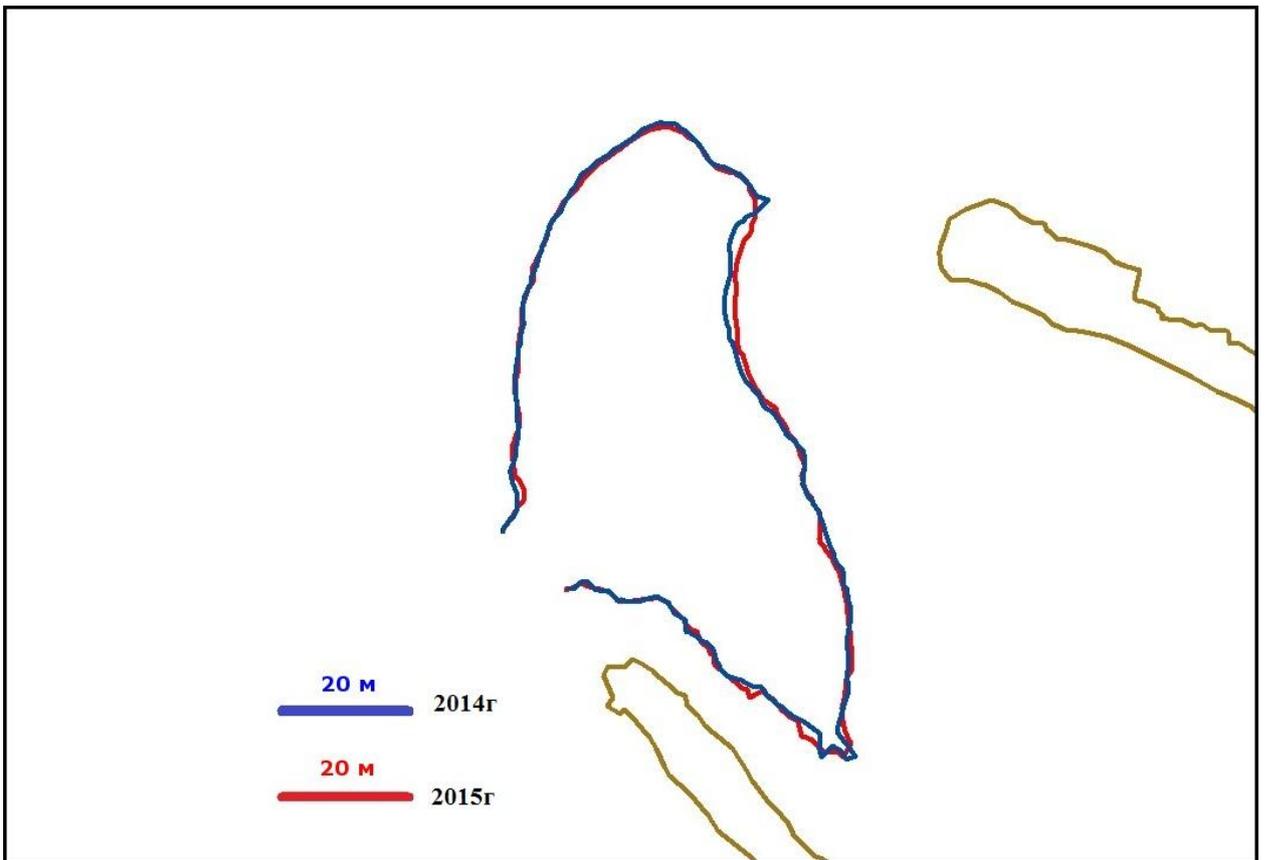
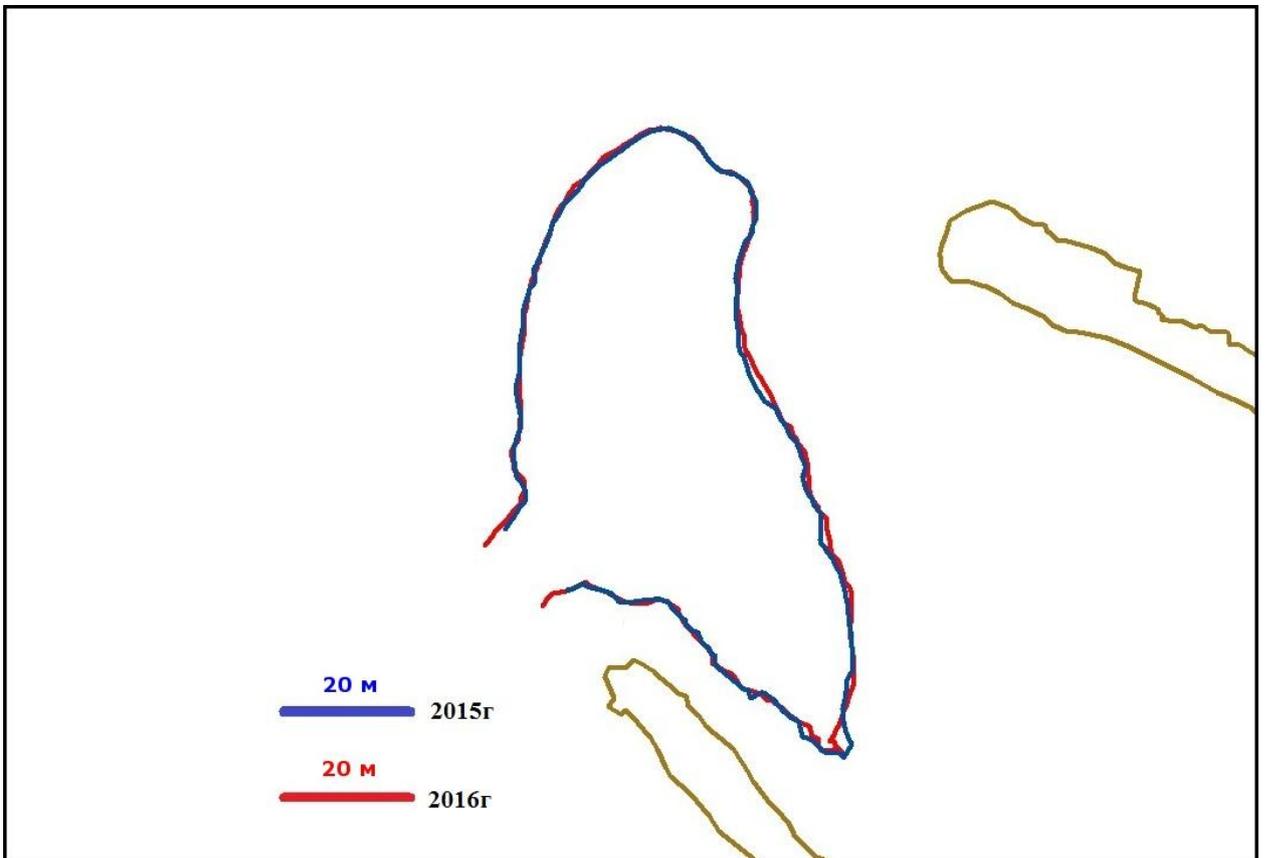


Рисунок 90 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2013-2014гг



**Рисунок 91 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2014-2015гг**



**Рисунок 92 Совмещенные контуры депрессии по изобате 28м по данным промеров за 2015-2016гг**

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Изображения продольных и поперечных профилей придонной депрессии по данным за 2008-2016г.

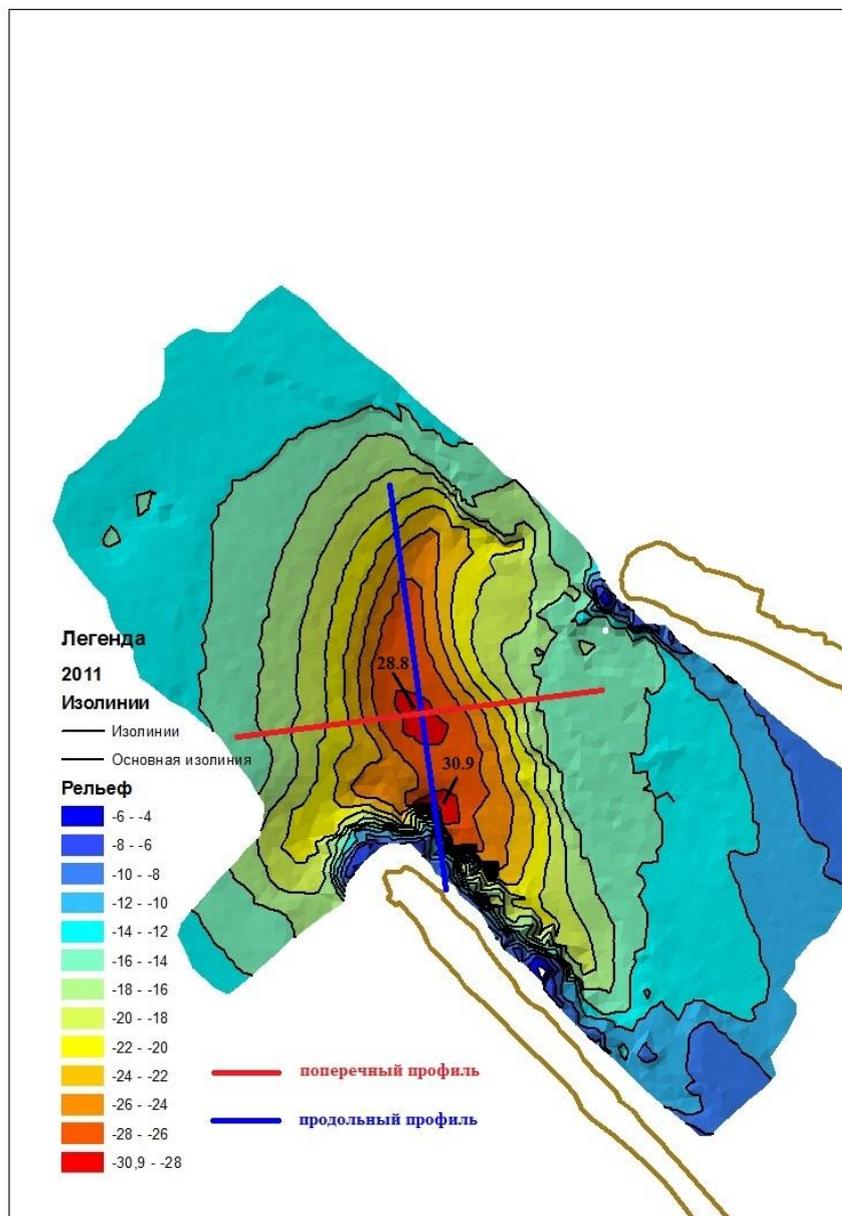
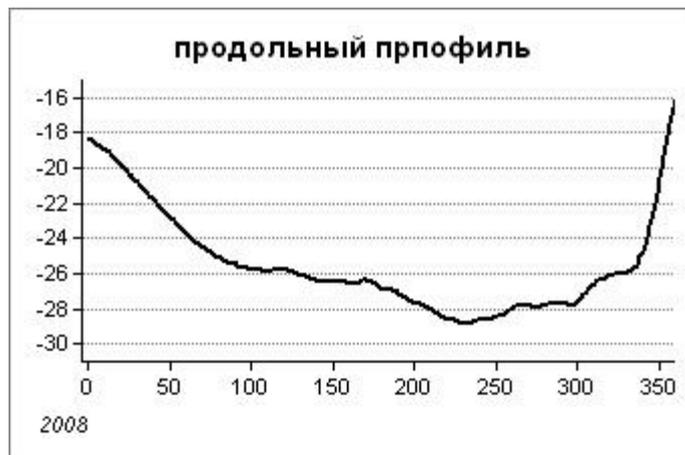
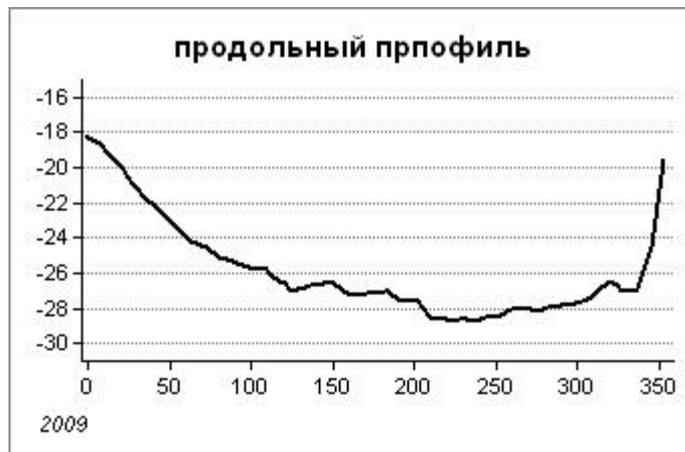


Рисунок 93 Изображение придонной депрессии по данным промера в 2011г с проведенными трассами профилей.



**Рисунок 94 продольный профиль по данным промера в 2008г**



**Рисунок 95 продольный профиль по данным промера в 2009г**



**Рисунок 96 продольный профиль по данным промера в 2010г**

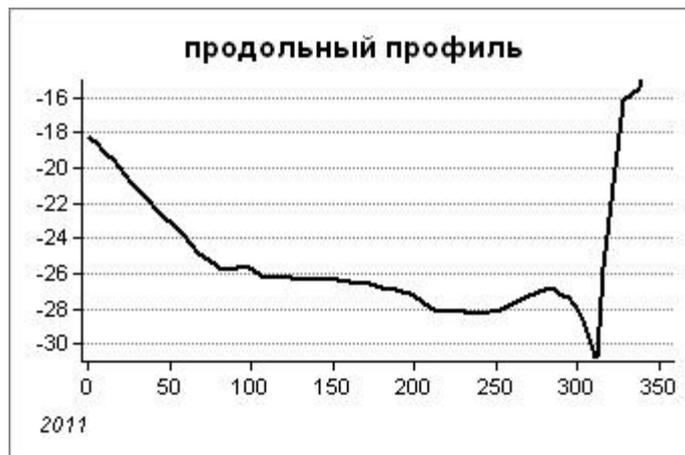


Рисунок 97 продольный профиль по данным промера в 2011г



Рисунок 98 продольный профиль по данным промера в 2012г



Рисунок 99 продольный профиль по данным промера в 2013г



**Рисунок 100 продольный профиль по данным промера в 2014г**



**Рисунок 101 продольный профиль по данным промера в 2015г**



**Рисунок 102 продольный профиль по данным промера в 2016г**



Рисунок 103 поперечный профиль по данным промера в 2008г

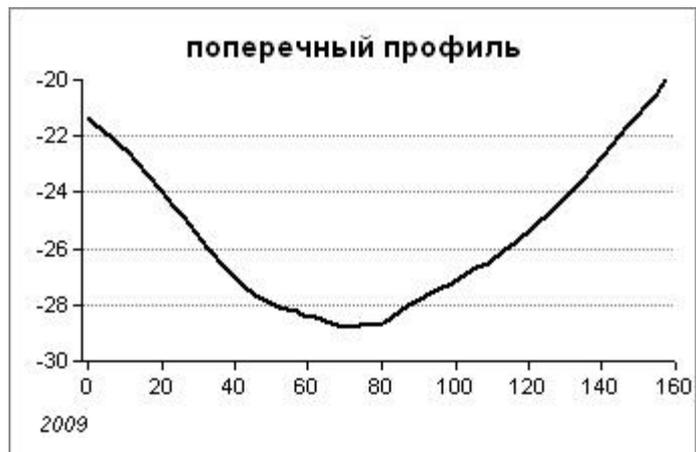


Рисунок 104 поперечный профиль по данным промера в 2009г

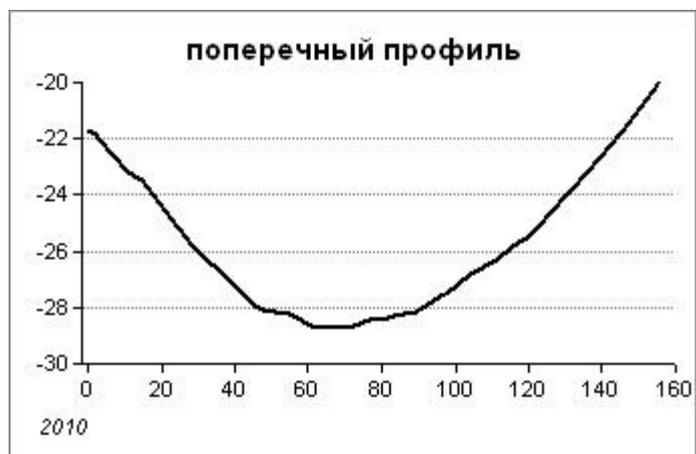


Рисунок 105 поперечный профиль по данным промера в 2010г

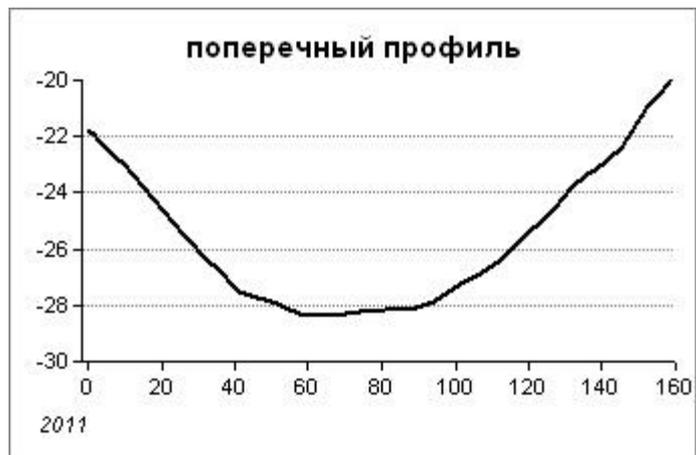


Рисунок 106 поперечный профиль по данным промера в 2011г



Рисунок 107 поперечный профиль по данным промера в 2012г



Рисунок 108 поперечный профиль по данным промера в 2014г



Рисунок 109 поперечный профиль по данным промера в 2014г

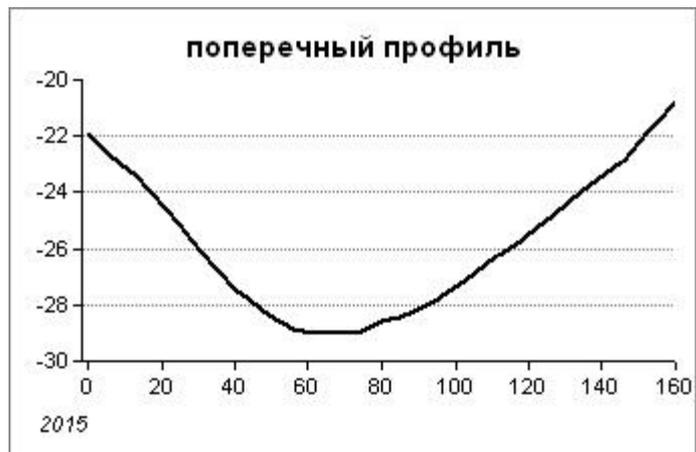


Рисунок 110 поперечный профиль по данным промера в 2015г



Рисунок 111