МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦУНАМИ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ»

Исполнитель: Ханина Анастасия Олеговна, студентка группы ПО-М18-1-8

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

_____

(подпись)

_____

(ученая степень, ученое звание)

_____

(фамилия, имя, отчество)

«___»_____20__г.

Санкт–Петербург

2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ – 6

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЦУНАМИ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ 6

1.1 Географическое положение Средиземного моря 6

1.2 Геоморфологическое строение моря 8

1.2.1 Моря 9

1.2.2 Реки 10

1.3 Гидрологический режим 11

1.4 Климат 13

1.5 Метеорологические цунами 13

1.5.1 Образование метеоцунами 14

1.5.2 Факторы возникновения метеоцунами 15

1.5.3 Последствия от метеоцунами 19

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦУНАМИ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ 21

2.1 Область применения ПК CARDINAL 21

2.2 Использование расчетов программы CARDINAL 21

2.2.1 Синоптические карты давления в дни опасных метеоцунами в Средиземном море 22

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 30

3.1 Пошаговый анализ формирования метеоцунами в программном комплексе CARDINAL 30

3.2 Анализ временного хода колебаний уровня на о.Менорка 40

3.3 Анализ временного хода колебаний уровня о.Сардиния 44
3.4 Анализ временного хода колебаний уровня на о. Сицилия 47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: 52

ВВЕДЕНИЕ

Метеорологические цунами являются опасным явлением для жителей Средиземноморья и интересной научной проблемой. В районе Средиземного моря прослеживаются интенсивные масштабные атмосферные возмущения, идущие в конкретном направлении и с конкретной скоростью, которые вызывают существенные колебания уровня в определенных акваториях.

Необходимые условия наблюдаются лишь летом, поэтому все знаменитые метеорологические цунами возникали в промежуток времени с 25 мая по 15 сентября [1,17]. Исследования, касающиеся метеорологических цунами, активизировались примерно 20 лет назад.

Проблема возникновения метеорологических цунами до сих пор является актуальной, так как постоянные метеоцунами наносят разрушения в бухтах и заливах, что оказывает негативное влияние на жизнь человека.

Оказалось, что небольшой перепад атмосферного давления может вызвать резкий подъем уровня воды в местах удаленных от атмосферного возмущения, напоминающие цунами от геологических явлений в океане. Метеорологические цунами наносят иногда ущерб, сравнимый с разрушениями от обычных цунами.

Цель работы – изучение механизма и моделирование непериодических колебаний уровня, вызванных метеорологическими цунами в Средиземном море.

Задачи работы:

- проанализировать случаи возникновения метеорологических цунами;
- подобрать синоптические карты для случаев метеорологических цунами в Средиземном море;
- выбрать параметры и траекторию характерного циклона в Средиземном море, вызывающего метеоцунами;
- провести численные эксперименты с параметрами и траекторией характерного циклона;

- провести анализ результатов.

Для подбора синоптических карт использован архив берлинского сайта [20].

Численные эксперименты по моделированию метеоцунами проводились на Программном комплексе CARDINAL, который позволяет задавать аналитически поле атмосферного давления с циклоном, с заданными параметрами и движущимся по заданной траектории [8].

ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ – МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЦУНАМИ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ

1.1 Географическое положение Средиземного моря

Средиземное море является межматериковым. Оно окружает своими водами Азию, Европу, Африку и соединяется с Атлантическим океаном через Гибралтарский пролив. Максимальная глубина моря достигает до 5267 м в Ионическом море, которое находится неподалеку от города Пилос на юге Греции [31].

Площадь 2500 тыс. км².

Объём воды 3839 тыс. км³.

По всему Средиземноморью средняя глубина моря составляет 1541 м, максимальная глубина равна 5121 м.

Протяженность Средиземного моря с запада на восток составляет 3800 км. Крайняя южная точка моря расположена в Африке в Сиртском заливе. Крайняя северная точка располагается в Адриатическом море. Западная точка Средиземного моря расположена в Гибралтаре, а восточная точка в заливе Искандерун, который находится на юге Турции. [29].

Ввиду своей формы межматериковый водоём подразделяется на 2 бассейна. Западный бассейн располагается от Гибралтара до Сицилии, а восточный бассейн находится от Силиции до побережья Сирии.

Минимальная ширина моря по меридиану составляет 130 км и пролегает между мысом Гранитоля (о. Сицилия) и мысом Бона (Тунис). Максимальная ширина Средиземного моря проходит между Триестом и заливом Большой Сирт, и составляет 1665 км [31].

К бассейну Средиземного моря принадлежат Мраморное, Чёрное и Азовское моря. Связь с ними реализовывается через проливы Дарданеллы и Босфор. Через Суэцкий канал Средиземное море связано с Красным морем и Индийским океаном.

Рисунок 1 – Карта расположения Средиземного моря [21]

Внутри межматерикового водоёма находится Адриатическое море, которое располагается между Апеннинским и Балканским полуостровами. С главными водами Адриатическое море смешивается с проливом Отранто, которое достигает ширины 47 км [32].

1.2 Геоморфологическое строение моря

Изрезанность береговой черты, форма и геоморфология дна Средиземного моря способствуют возникновению колебаний уровня моря разного происхождения, в том числе метеорологического цунами. Поэтому необходимо кратко описать геоморфологию моря.

По геоморфологическому строению Средиземное море делится на 3 бассейна. Первый бассейн называется Западный - Алжиро-Прованский. Он имеет максимальную глубину свыше 2800 м. Данный бассейн связывает впадины морей Балеарского, Лигурийского, Альборан, а также впадину Тирренского моря с максимальной глубиной более 3600 м.

Второй бассейн имеет название Центральный, глубина которого составляет более 5100 м.

Третий бассейн называется Восточный – Левантинский. Глубина этого бассейна составляет свыше 4380 м. Он включает в себя впадины Эгейского и Мраморного морей и моря Леванта [29, 31].

Дно отдельных котловин окутано неоген-антропогеновыми толщами осадочных и вулканических пород, которые в Балеарском и Лигурийском море имеют мощность 5-7 км. Среди мессинских отложений верхнего миоцена Алжиро-Прованской котловины существенная значимость относится к соленосной толще (мощностью более 1-2 км). Эта толща образует структуру, характерную для соляной тектоники [30].

По бортам и в середине Тирренской котловины тянутся ряды больших разломов, которые принадлежат к потухшим и действующим вулканам. Отдельные из них образуют крупные подводные горы. Например, на Липарских острова имеется вулкан Вавилова.

Вулканы по пограничной области котловины в Тосканском архипелаге, на Понцианских островах, на вулкане Везувий, на Липарских островах извергают кислые и щелочные лавы. Вулканы в центре, и в отдельных

частях Средиземного моря извергают наиболее глубинные породы, такие как базальты (основные лавы).

Часть Восточного (Левантинский) и Центральный бассейны уплотнены осадочными толщами, в том числе массивными продуктами речных выносов, предпочтительно у берегов Нила. На дне этих котловин, по сведениям геофизических исследований, расположены Гелленский глубоководный жёлоб и Центральный Средиземноморский вал [30, 31].

По границе подножия материкового склона Киренаики наблюдается Ливийский жёлоб. Данный желоб имеет явно выраженный рельеф и еле заметно заполнен осадками.

В Средиземном море котловины имеют разное время по происхождению. Большая часть Восточного (Левантинского) бассейна образовалась в мезозойскую эру. Часть Алжиро-Прованского бассейна заложилась с конца последней эпохи палеогенового периода – олигоцена и с начала эпохи миоцена. Отдельные котловины в Средиземном море образовались в начале и середине миоцена, а также в последующей эпохе в плиоцене. В конце эпохи миоцена на значительной части площади Средиземного моря уже присутствовали отмелистые котловины.

1.2.1 Моря

В бассейне Средиземного моря выделяют основные моря, как его части: Адриатическое, Балеарское, Ионическое, Кипрское, Критское, Левантийское, Ливийское, Лигурийское, Альборан, Тирренское и Эгейское, Мраморное, Чёрное и Азовское моря.

Самые значимые заливы бассейна Средиземного моря: Лионский, Таранто, Сидра, Валенсийский, Габес.

Самые обширные острова Средиземного моря: Сицилия, Кипр, Балеарские острова, Сапдиния, Корсика (рис.2) [21].

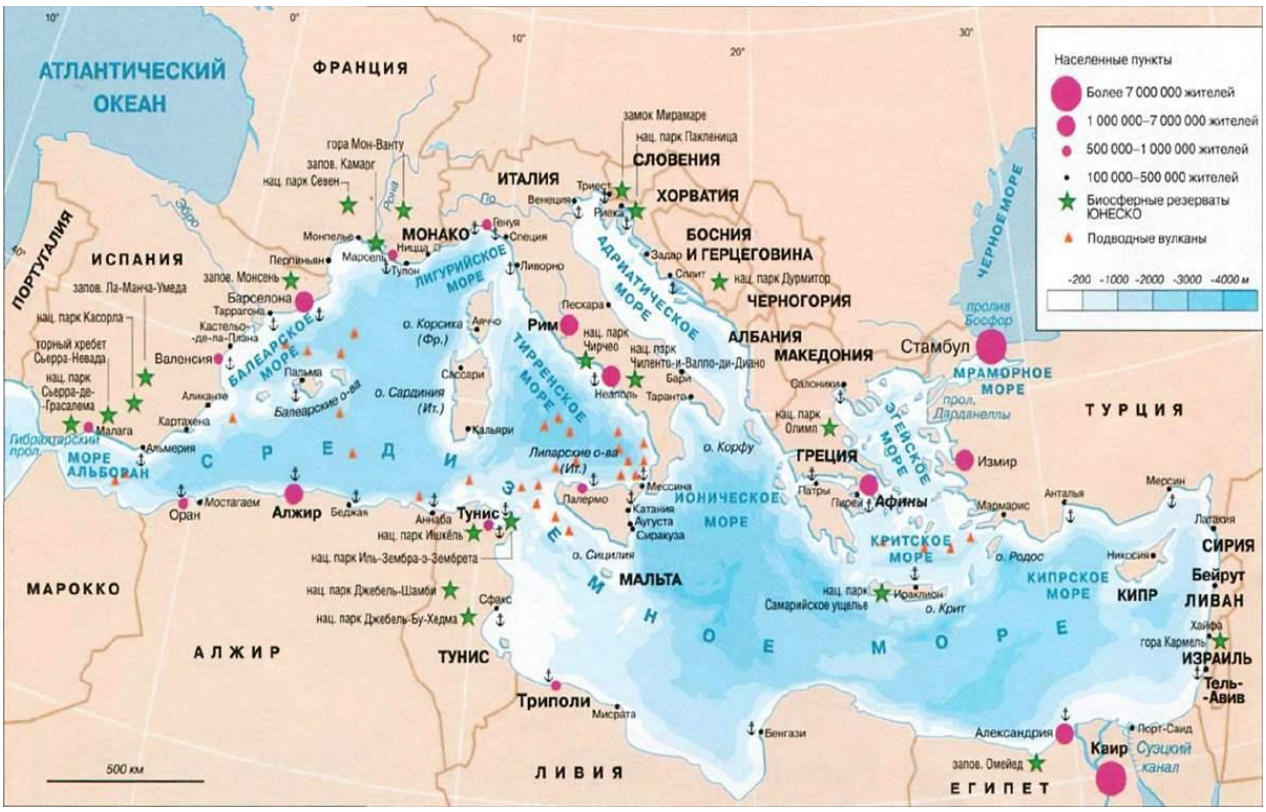

Рисунок 2 – Расположение Средиземного моря с указанными морями, островами и населением [26]

1.2.2 Реки

В Средиземное море впадают многочисленные обширные реки, такие как Нил. Река Нил известна всем своей значимостью. Она является второй по длине реке в мире. В Средиземное море вливается самая большая в Италии река По, река составляет 652 км [32].

Также в Средиземное море впадают итальянская река Тибр, которая имеет длину 405 км, крупнейшая река Испании Эбро, которая имеет длину 910 км и река Рона. Река Рона протекает через Францию и Швейцарию и имеет длину 812 км.

Дно Средиземного моря разделяется на отдельные котловины с сравнительно обрывистыми материковыми склонами, глубиной 2000-4000 м.

Котловины по длине Средиземного моря выточены узкой полосой шельфа, которая разрастается лишь между побережьем Туниса и Сицилией, а также у границ Адриатического моря.

1.3 Гидрологический режим

Гидрологический режим Средиземного моря генерируется под действием массивного испарения и общих климатических условий. Доминирование расхода пресной воды над приходом приводит к понижению уровня, что представляет собой причину бесконечного притока поверхностных не столь солёных вод из Атлантического океана и Чёрного моря.

В абиссальных слоях проливов осуществляется отток высокосолёных вод, порожденный перепадом плотности воды на уровне порогов проливов. Через Гибралтарский пролив проходит важнейший водообмен.

Верхнее течение из Гибралтарского пролива доставляет атлантические воды объемом в 42,33 тыс. км³ в год, а нижнее – выносит средиземноморской воды примерно 40, 80 тыс. км³. Через пролив Дарданеллы втекает 350 км³ и вытекает 180 км³ воды в год [28].

Циркуляция вод в Средиземном море имеет, преимущественно, ветровое происхождение. Она представлена ведущим, практически зональным Канарским течением, переносящим воды предпочтительно атлантического возникновения вдоль Африки, от Гибралтарского пролива до берегов Ливана.

Слой воды до глубины 750-1000 м окутан узконаправленным по глубине переносом вод. Исключение составляют левантийские воды, которые протекают от острова Мальта до Гибралтарского пролива возле Африки.

Скорости сформировавшихся течений в открытой части моря составляют 0,5-1,0 км/ч, в отдельных проливах скорость течений равна 2-4 км/ч.

Обширное испарение приводит к значительному повышению солёности. Значения солености возрастают с запада на восток от 36 ‰ до - 39,5 ‰. Плотность воды на поверхности летом колеблется от 1,023-1,027 г/см³, а зимой составляет примерно до 1,027-1,029 г/см³.

Зимой в период водоохлаждения в местах, где плотность воды повышена, формируется ярко выраженное конвективное перемешивание. Оно порождает образование высокосолёных и тёплых промежуточных вод в восточном бассейне и абиссальных вод на севере западного бассейна, в Адриатическом и Эгейском морях.

Средиземное море является лидером морей Мирового океана по придонной температуре и солености (12,6-13,4°С и 38,4-38,7 соответственно). Относительная прозрачность воды составляет около 50-60 м. Цвет воды обычно интенсивно синий [28].

С поверхности Средиземного моря испаряется до 1250 мм в год . Это практически 3130 км^3. Относительная влажность воздуха колеблется от 50-65% летом до 65-80% зимой. Летом облачность над Средиземным морем составляет 0-3 балла, а зимой около 6 баллов.

Количество среднегодовых осадков составляет около 400 мм, это примерно 1000 км^3. Осадки меняются от 1100-1300 мм на северо-западе и до 50-100 мм на юго-востоке. Минимум осадков наблюдается в июле-августе, максимум - в декабре.

1.4 Климат

Климат средиземноморский, своеобразный. Средиземноморье обладает жарким и сухим летом и мягкой зимой. Зимой на море зачастую прослеживаются шторма и ливни, царят ветра местного происхождения бора и мистраль.

Для лета характерны солнечная погода, наименьшая облачность и минимальные осадки. Изредка над Средиземным морем в летний период бывают туманы. Иногда отслеживается пыльная мгла, которую выносит из Африки ветер сирокко [31].

Средняя температура воды на поверхности бассейна Средиземного моря снижается с севера на юг. В феврале температура воды изменяется в пределах от 8Cº-12C º , а на юге достигает 17 °C. В восточной и центральной частях температура воды Средиземного моря изменяется от 11°C до 15 °C на востоке и 3°C составляет в центре моря.

В августе средняя температура воды повышается от 19°C до 25°C. На севере средние значения температуры составляют 22-24°C. На востоке у крайнего побережья Средиземноморья и на юге температуры воды изменяется от 26°C до 30 °C [28].

1.5 Метеорологические цунами

Метеорологические цунами — это волны, которые имеют такие же временные и пространственные масштабы, как волны цунами, и могут проявлять на побережье аналогичное сокрушительное воздействие [16].

Но метеоцунами возникают не из-за землетрясений, извержений вулканов или подводных оползней, а в результате атмосферного процесса: тайфуны, ураганы, линии шквалов, прохождение фронтальных зон, атмосферные внутренние волны или просто скачки атмосферного давления [12].

Метеоцунами в течение долгого периода возникали в водоемах на всех континентах (кроме Антарктиды, где нет доказательств). В определенных местах, таких как бухта Нагасаки в Японии, гавань Сьютаделла на Менорке или побережье Хорватии. Метеоцунами встречаются неоднократно и могут достигать до 6 м. Они также повторяются в Великих озерах Лаврентия, где сильные течения особенно опасны [33].

1.5.1 Образование метеоцунами

Для генерации мощного метеорологического цунами необходимы условия, отличные от других природных явлений. Совокупность определенных внешних и внутренних факторов. Для развития метеоцунами должны произойти сильные мелкомасштабные атмосферные возмущения, которые будут двигаться в конкретном направлении и с конкретной скоростью [15,18].

Такие условия ученые наблюдают лишь летом. Как известно метеорологические цунами генерируются с конца мая по середину сентября. Также для развития сильного метеоцунами существуют и другие факторы.

Прежде всего, предполагается присутствие особого рельефа, который благоприятствует наращиванию приходящих волн и развитию мощных собственных колебаний в разрезе конкретной акватории. При метеоцунами сильные колебания одновременно могут распространяться и на соседние порты и бухты, но с высотой чуть меньше, чем в основном эпицентре [4,38].

Районы, в которых метеоцунами наблюдаются довольно часто, они имеют свои местные названия. Балеарские острова называются риссага, берега Сицилии называют маррубbио, Япония — абики [13].

1.5.2 Факторы возникновения метеоцунами

Большинство мощнейших метеорологических цунами происходили в солнечную погоду, при условии, что видимые атмосферные катаклизмы отсутствовали. Дальнейшие исследования доказали, что все случаи метеоцунами такого типа зависят от прохождения скачков атмосферного давления или части атмосферных волн [33,34]. Научные исследования подтвердили, что возникновения метеоцунами связаны со скачками атмосферного давления или серией атмосферных волн (рис.3).

Изменения давления в возмущениях такого типа достигает примерно 1–3 гПа (мбар), реже – 5 гПа. Для сравнения: разница давления в глубоком циклоне часто составляет 30–40 гПа, а в больших тайфунах и ураганах может достигать выше 80 гПа.

Когда происходят возмущения в 1–3 гПа, то на лентах барографа, который используется многие десятилетия, не заметны эти мелкомасштабные перемены. Эти возмущения могут происходить далеко от места, где возникает собственно цунами. Тем более эти возмущения не ощущают люди, находясь почти в эпицентре нагона волны на берег [2].

Из-за того, что люди не чувствуют такие незначительные скачки атмосферного давления, для наблюдателей метеоцунами происходят неожиданно. Особенно в местах, где ранее подобные катаклизмы не случались. Люди пытаются найти ответ на эти неизвестные явления и предполагают, что это вызвано оползнями, взрывами или подводными землетрясениями. Но специалисты выяснили, что данные скачки вызывает небольшой перепад атмосферного давления.

Благодаря достоверным цифровым установкам, которые измеряют уровень моря и высокоточным микробарографам, ученые принимают синхронные записи атмосферного давления и уровня моря. Такие записи позволяют доказать тесную связь данных процессов [6,7].

В настоящее время, существуют численные модели, которые благодаря наблюдениям за атмосферным давлением, могут воспроизводить метеоцунами, которые проходили в прошлом.

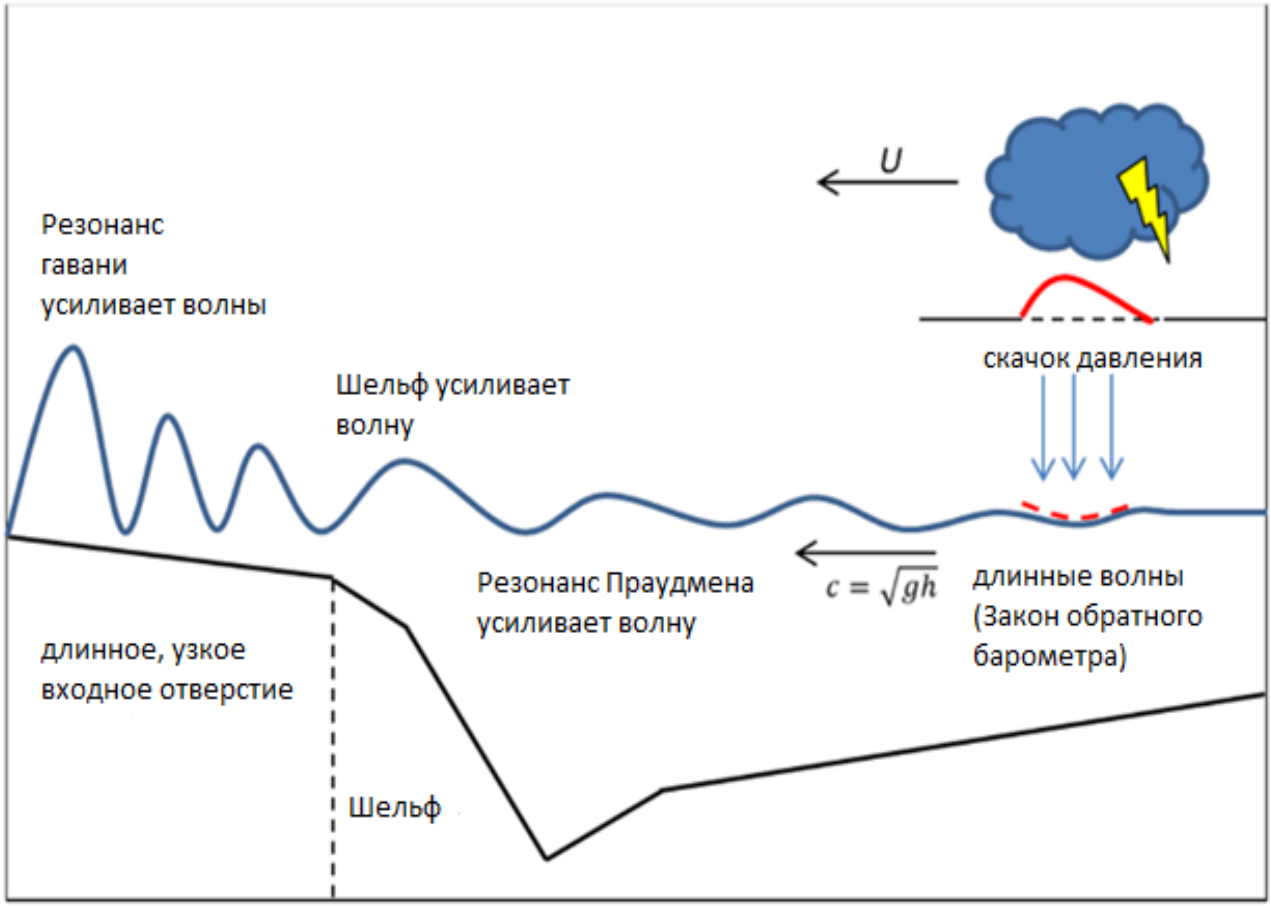

Рисунок 3 – Процесс возникновения длинных океанических волн [3837]

В океане функционирует *закон обратного барометра*, в соответствии с которым перепад атмосферного давления на 1 гПа приведет к изменению уровня моря на 1 см с противоположным знаком.

Поэтому перепад атмосферного давления, например, на 3-5 гПа приведет к поднятию уровня на 3–5 см. По фактическим данным высота волн, вызванных метеорологическим цунами, достигнет несколько метров [36]. Но такие колебания уровня возникают вдали от источника колебаний, вблизи берега, в бухтах или заливах.

Если изучить основы гидродинамики, то можно выявить схожесть между волнами цунами и метеорологическими цунами, тем не менее, физический механизм образования этих волн значительно различается. Метеорологическое цунами это резонансное явление. Сильные колебания поверхности океана возникают лишь в момент совпадения скорости распределения атмосферного возмущения (U) и скорости длинных океанских волн (c).

Скорости длинных океанских волн рассчитываются по формуле Лагранжа [15]:

$$c = \sqrt{gb}, \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести, а h — глубина океана.

Например, если глубина на шельфе Балеарских островов равна h = 60 м, то подставив в формулу Лагранжа скорость волн, будет равна $c \approx 25$ м/с.

Атмосферные волны, проходящие с такой скоростью, могут дать толчок к образованию резонанса и сформировать длинные океанские волны. Этот процесс наблюдался на Балеарских островах 15 июня 2006 г [36]. Такой тип резонанса ($c \approx U$) в океанологии ученые называют резонансом Праудмена [14].

Для формирования мощного метеорологического цунами недостаточно резонансного совпадения скоростей распределения атмосферного возмущения (U) и скорости длинных океанских волн (с).

Необходимо, чтобы вкупе с совпадением скоростей были задействованы еще определенные факторы.

Прежде всего, быстрый перепад атмосферного давления на 2-3 гПа за 10 мин, определенный сектор распространения и индивидуальные особенности местной топографии конкретного района [13].

Также существует еще один определяющий фактор, характеризующий интенсивность проявления волн цунами и метеоцунами вблизи берега. Это резонансные особенности локальной акватории, которая располагается в вершине залива (бухта Вела-Лука) или прилегает к берегу (бухта Сьютаделлья).

В каждой бухте или порту имеются сейши, т.е. стоячие колебания. Периоды собственных колебаний данного района определяются его типом, формой, размером и другими показателями.

На сегодняшний день лишь немногие исследования выявили роль воздействия синоптического масштаба на активность сейш, примечательными исключениями являются идентификация «метеорологических цунами», когда явление, подобное внутреннему сейшу закрытого водоема, наблюдается в прибрежных входах.

Метеорологические цунами вызваны низкочастотными, высокими амплитудными возмущениями атмосферного давления. Сходные исследования, включающие учет активности сейш, наблюдаемых в Роттердамской гавани, где данные о ветре с береговой метеорологической станции были связаны с прохождением холодных фронтов и связанных с ними постфронтальных конвекционных камер [35].

Важную значимость представляет низшая фундаментальная мода, по-другому «мода Гельмгольца», «нулевая мода» или «мода накачки». Данная мода имеет большой период и единственная «узловую линию». Это линия, которая не имеет колебаний и находится на входе в акваторию. В бухтах и гаванях мода влияет на периодичное пополнение и слив воды [3].

В бухте Сьютаделлья фаза фундаментальной моды равна 10 минут, а в бухте Вела-Лука примерно 20 минут. Обычно такая мода преобладает в береговых районах, и от нее зависят периодические приливно-отливные колебания.

Если период приходящих волн из внешнего бассейна приближен к периоду собственного колебания внутреннего бассейна, то совершается

резонанс гавани [5,10]. Это происходит за счет резонанса собственных колебаний.

Массовые наблюдения, за районами Балеарских островов и Адриатики, доказывают, что метеорологические цунами в данных районах возникают в жаркое время года. Ниже приведены синоптические условия, которые должны присутствовать при возникновении метеоцунами:

- поступление теплого и невлажного воздуха из Африки на высоте ~1500 гПа (~1500 м);
- наличие сильно-выраженного струйного течения, протекающего с юго-запада на высоте ~500 гПа (~5000 м);
- наличие атмосферных слоев с большой вертикальной неустойчивостью (Должно присутствовать условие $R_i < 0,25$) на высотах 600–400 гПа [16].

Из всего сложного комплекса факторов, вызывающих метеоцунами, для моделирования в данной работе было выбрано прохождение атмосферного возмущения (циклона с фронтом) со значительным изменением давления. Такое возмущение вызывает длинную волну, которая при входе в бухту или залив может вызвать сильные колебания уровня, в том числе при резонансных процессах с собственными колебаниями бассейна.

1.5.3 Последствия от метеоцунами

Приходящие на берег волны, сметают на своем пути постройки, яхты, лодки, туристическую продукцию (рис.4.1-4.2).

Многие люди, при отступлении воды обратно в море, не осознают, что опасность уже близко. Они бегут собирать ракушки, и тем самым их жизни может угрожать опасность.

Также они наносят вред окружающей среде, так как разрушает флору и фауну и нарушают целостность экосистем.

Рисунок 4.1 – Последствия метеоцунами в бухте Вела-Лука [27]

Рисунок 4.2 – Последствия метеоцунами в бухте Сьютаделла [27]

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦУНАМИ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ

2.1 Область применения ПК CARDINAL

CARDINAL – это программный комплекс, с помощью которого создают математические модели для моделирования водных объектов. Благодаря ПК CARDINAL можно рассчитывать распределение растворенных и взвешенных загрязняющих веществ, температуру, соленость и транспорт донных наносов [8].

CARDINAL имеет развитый пользовательский интерфейс. Название образовано от слов **C**oastal **Ar**ea **D**ynamic **In**vestigation **Al**gorithm. ПК CARDINAL предназначен для расчетов стоковых, ветровых, приливных, плотностных и других типов течений и колебаний уровня. Объектами исследований могут быть озера, водохранилища, реки, эстуарии, заливы, моря [8].

2.2 Использование расчетов программы CARDINAL

В данной работе программный комплекс CARDINAL использовался для расчета временного хода уровня воды и движения циклона с 23 июня по 27 июня 2014 года. Были выбраны именно эти даты, так как в эти дни был разрушительный метеоцунами, который обрушился 24 июня на Балеарские острова. Далее циклон сместился на восток, и принес 25–26 июня крупные разрушения в районе Тирренского и Адриатического морей.

Для моделирования метеорологического цунами были изучены синоптические карты с движением циклонов над Средиземным морем. В ПК CARDINAL были заданы начальные координаты циклона на 43°с.ш. и 3°з.д.

Для расчетов метеоцунами программе требуются входные данные о расчетной области, начальные условия развития циклона, атмосферное давление в центре, скорости ветра и течений, максимальные и минимальные значения глубины. Эти данные получены из работы К.А. Клеванного [9].

Данные на выходе – это скорости ветра и течения в районе развития циклона, удельные расходы воды и изолинии уровня, временной ход уровня колебаний вод в исследуемом районе.

2.2.1 Синоптические карты давления в дни опасных метеоцунами в Средиземном море

Характерный пример метеорологического цунами произошел 15 июня 2006 г. на острове Менорка (рис.5). Быстрый скачок давления над Балеарскими островами примерно на 5 гПа, привел к разрушительным колебаниям уровня моря в бухте Сьютаделлья высотой около 5 м.

Примерно 40 лодок и яхт было разрушено, экономический ущерб составил 30 млн. евро. Соотношение скачков давления и высоты волн риссага составляет около 1:100. С физической точки зрения трудно объяснить столь сильную реакцию океана. Именно скачок давления привел к наводнению, эти выводы подтверждаются результатами численного моделирования [16].

Каждое лето в бухте Сьютаделлья наблюдаются метеоцунами около 1 м, а примерно через 5 лет происходят разрушительные катаклизмы с высотами колебаний уровня свыше 3 м.

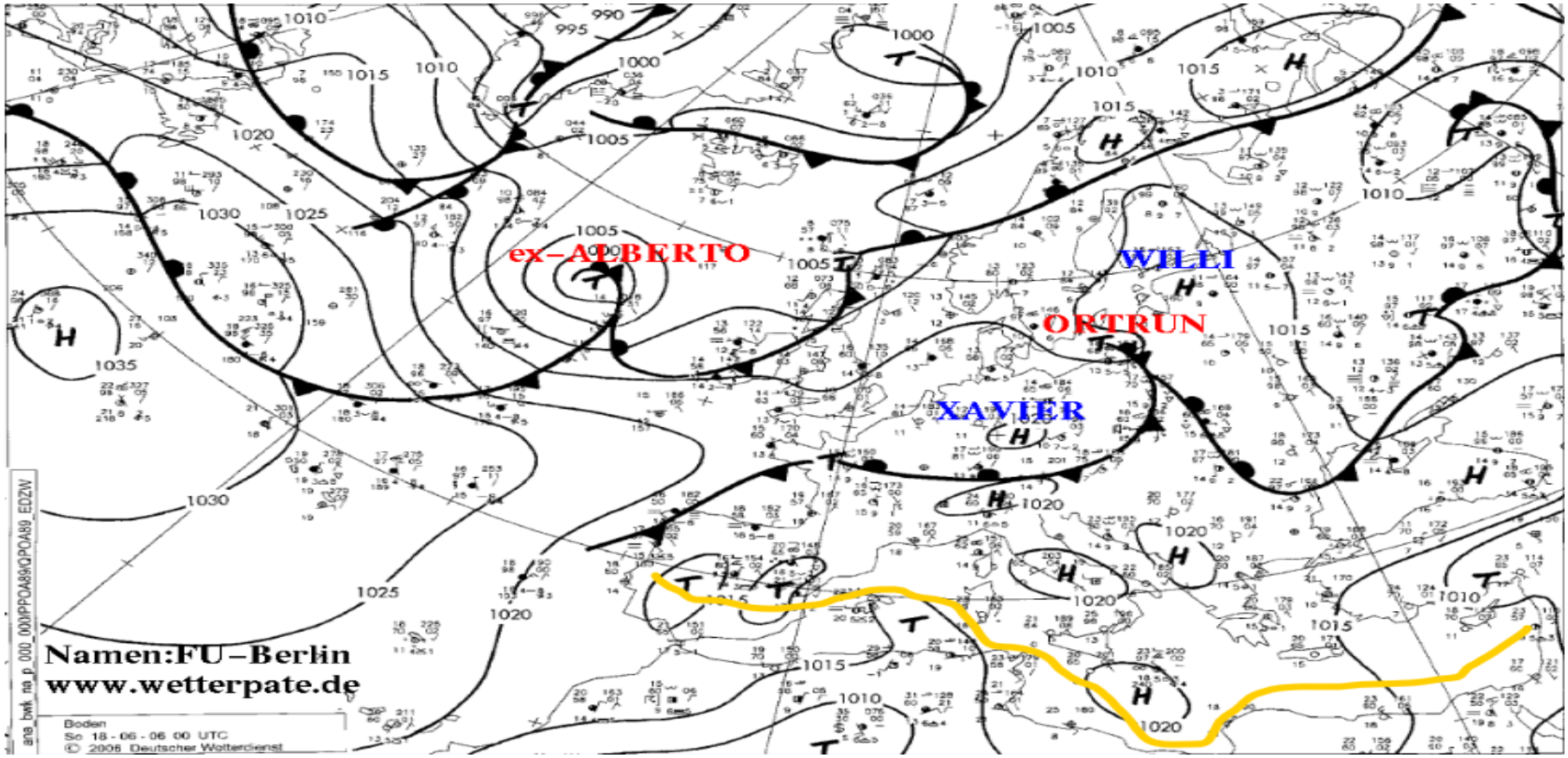

Рисунок 5 – Синоптическая карта в районе Средиземного моря с 15-20 июня 2006 года с траекторией движения циклона [20]

Волны риссага, зафиксированы на островах Ивиса, Кабрера, Менорка, в бухте о. Майорка и на прибрежных участках Испании.

Сейши являются экстремальными колебаниями, которые происходят из-за перепадов давления атмосферы. Происходят обычно в заливах и наносят сильный ущерб береговым районам, яхтам, портовым сооружениям [11].

Бухта Сьютаделла на острове Менорка является ярким примером возникновения сейш. В данном районе их называют риссага.

Ученые анализируют сейши для определения параметров атмосферы, ответственных за генерацию сейш большой амплитуды [36]. Ученые выявили, что обычные колебания волн значительно отличаются от возникновения сейш. Также должны совпасть, определенные факторы, для того чтобы возник резонанс для образования разрушительных волн.

Недавно ученые выявили, что на входе в бухту колебания волн риссага зависят от крупных атмосферных возмущений. Они распространяются с юго-запада, совпадают с ориентацией входа и имеют фазовую скорость около 3 м/с, которая близка к фазовой скорости длинных волн от берега Менорки.

На входе в бухту Сьютаделла волны усиливаются из-за резонансных свойств данной акватории [15].

23 июня 2014 года на побережье Средиземного моря сложилась критическая обстановка. На Балеарских островах в тот день объявили предупреждение о надвигающейся угрозе умеренного метеорологического цунами [15]. Эта угроза надвигалась на Средиземноморье с западной стороны.

Данные действительных точных измерений в Сьютаделле доказали, что в момент колебания уровня моря около 1 метра над бухтой проходили сильные атмосферные волны.

Измерения и анализ данного явления показали, что в прибрежном районе течения достигли практически 4 узла и доставили много хлопот капитанам и морякам. Далее циклон, продолжал усиливаться, смещаясь на восток ближе к Тирренскому и Адриатическому морям. А максимальное развитие циклона обрушилось 25–26 июня (рис.6) на данные районы [17,25].

25 июня циклон появился на побережье Хорватии и в Мазаро-дель-Вальо у Сицилии. 26 июня сильные колебания были замечены в Греции и Турции, а 27 июня было обрушено так называемое «Одесское цунами» в Черном море.

Мощнейшее метеорологическое цунами, которое двигалось со скоростью 25 км/ч, наблюдалось в Мазаро-дель-Вальо, около западных берегов Сицилии. В данном пункте не ожидалось наблюдать подобное явление, поэтому измерения приборов колебаний уровня моря и атмосферного давления не были записаны.

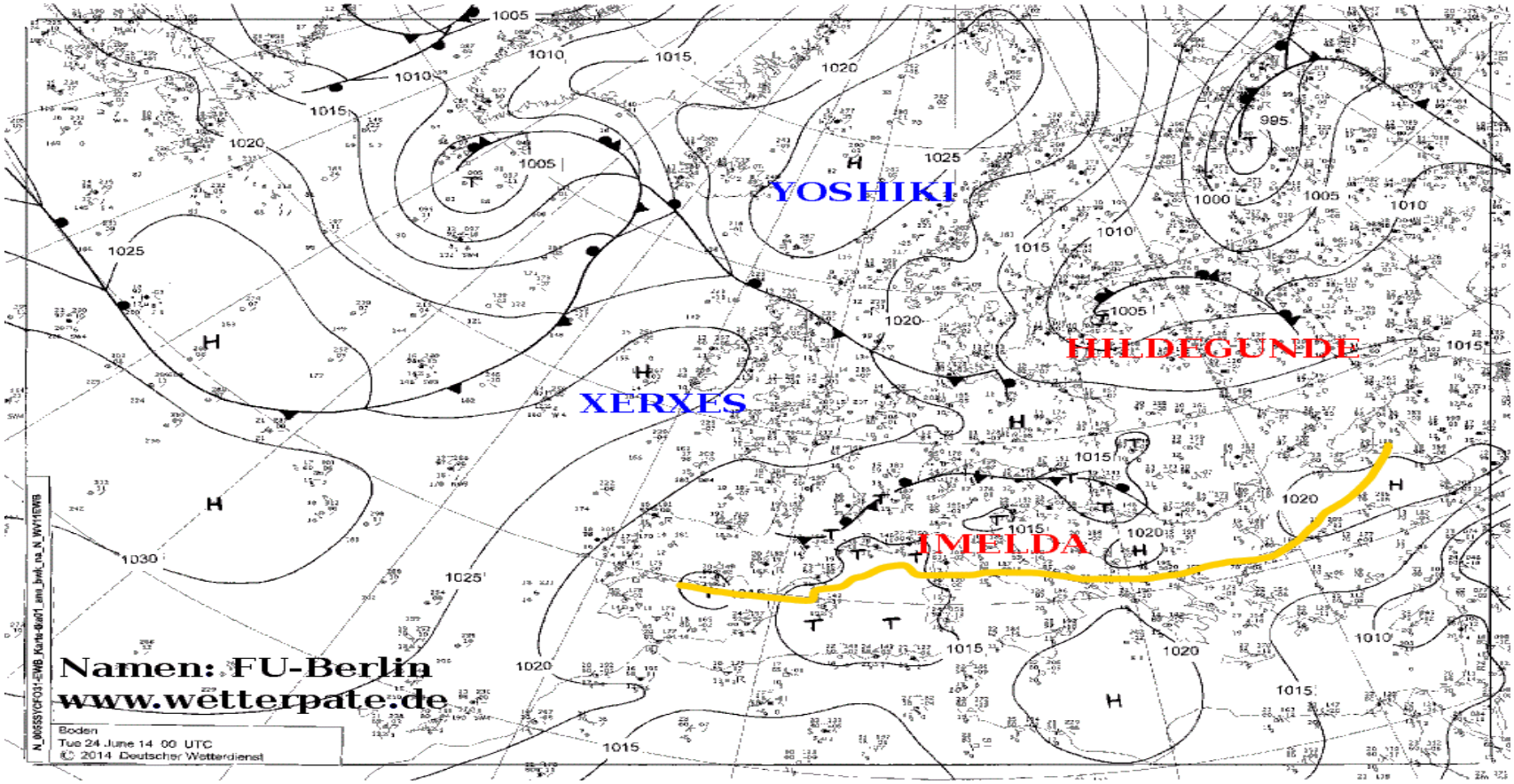

Рисунок 6 – Синоптическая карта в районе Средиземного моря с 23-27 июня 2014 года с траекторией движения циклона [20]

После прохождения циклона над Балеарскими островами, крупные наводнения, вызванные метеорологическими цунами, отмечались у прибрежного района Хорватии, около 500 км на север от острова Сицилия.

Наиболее сильные колебания наблюдались в Вела-Луке (~2,5 м). Здесь были получены четкие данные о проходивших атмосферных волнах, с которыми связаны колебания уровня моря у берегов Хорватии [16].

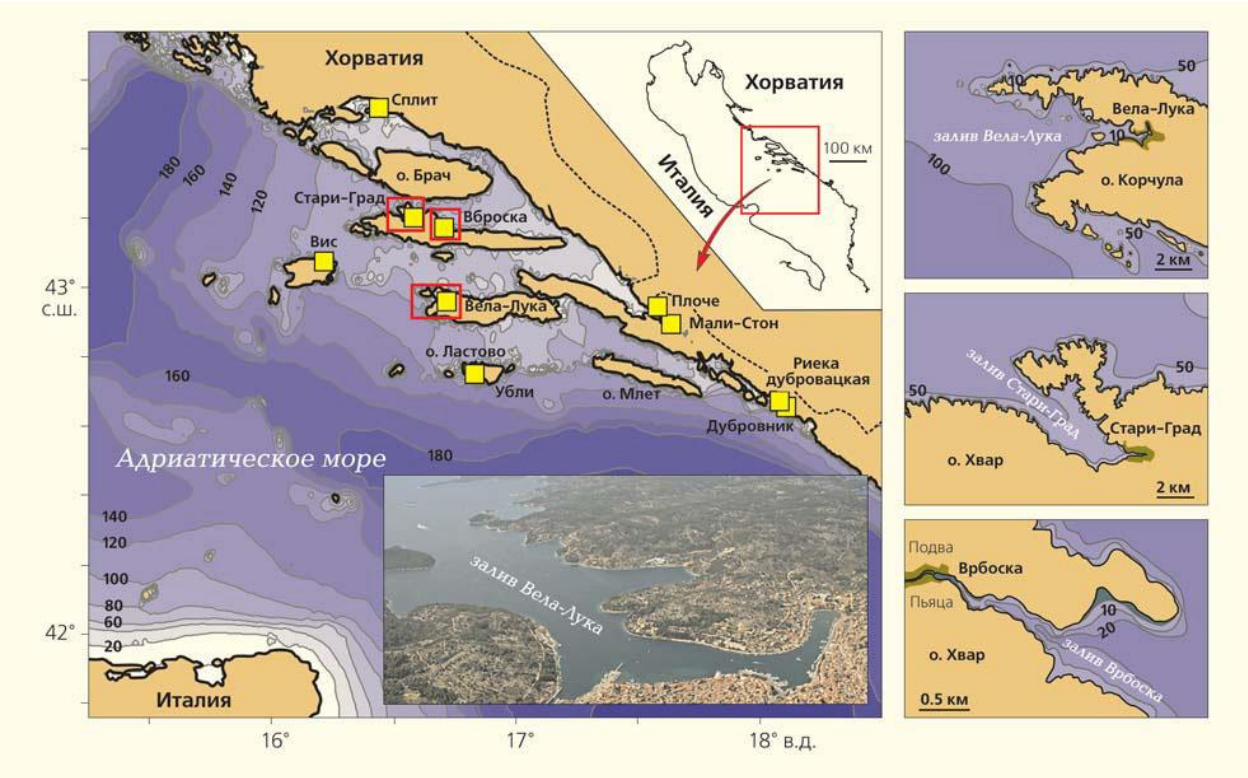

Рисунок 7 – Побережье Хорватии, с местами отмеченным желтым, которые подвержены опасности возникновения метеоцунами [16]

В поселке Вела-Лука, который находится на острове Корчула принадлежащий Хорватии, жители увидели надвигающиеся молнии. Но неожиданно шторм прекратился. А 25 июня в 8:30 уровень моря начал резко возрастать. Буквально за несколько минут уровень моря возрос на 1,5 метра.

Волна, пришедшая на набережную, разрушила улицы и дороги, были выброшены на берег яхты и лодки. Однако через десять минут уровень воды упал на три метра. Гавань и внутренняя бухта превратились в бушующую реку, которая устремилась в море [22,25].

Еще одно метеоцунами случилось 18 июля 2018 года (рис.8). Оно обрушилось на курортные острова Менорка и Мальорка (Балеарские о-ва). На пляжи обрушились волны высотой 1,5-1,8 м.

Многие акватории были затоплены. Приборы зарегистрировали колебания уровня на юго-западе Мальорки в Андраксе, на севере в Алькудии и на западе в бухте Сьютаделла о. Менорка.

Подводя итог, можно сделать вывод, что метеорологическое цунами это опасное стихийное бедствие и занимательное природное явление. Сейчас ученые находятся в самом начале изучения этого процесса. Данный процесс требует тщательных разработок и высокоточных данных, так как метеоцунами представляют серьезную угрозу для отдельных районов Мирового океана.

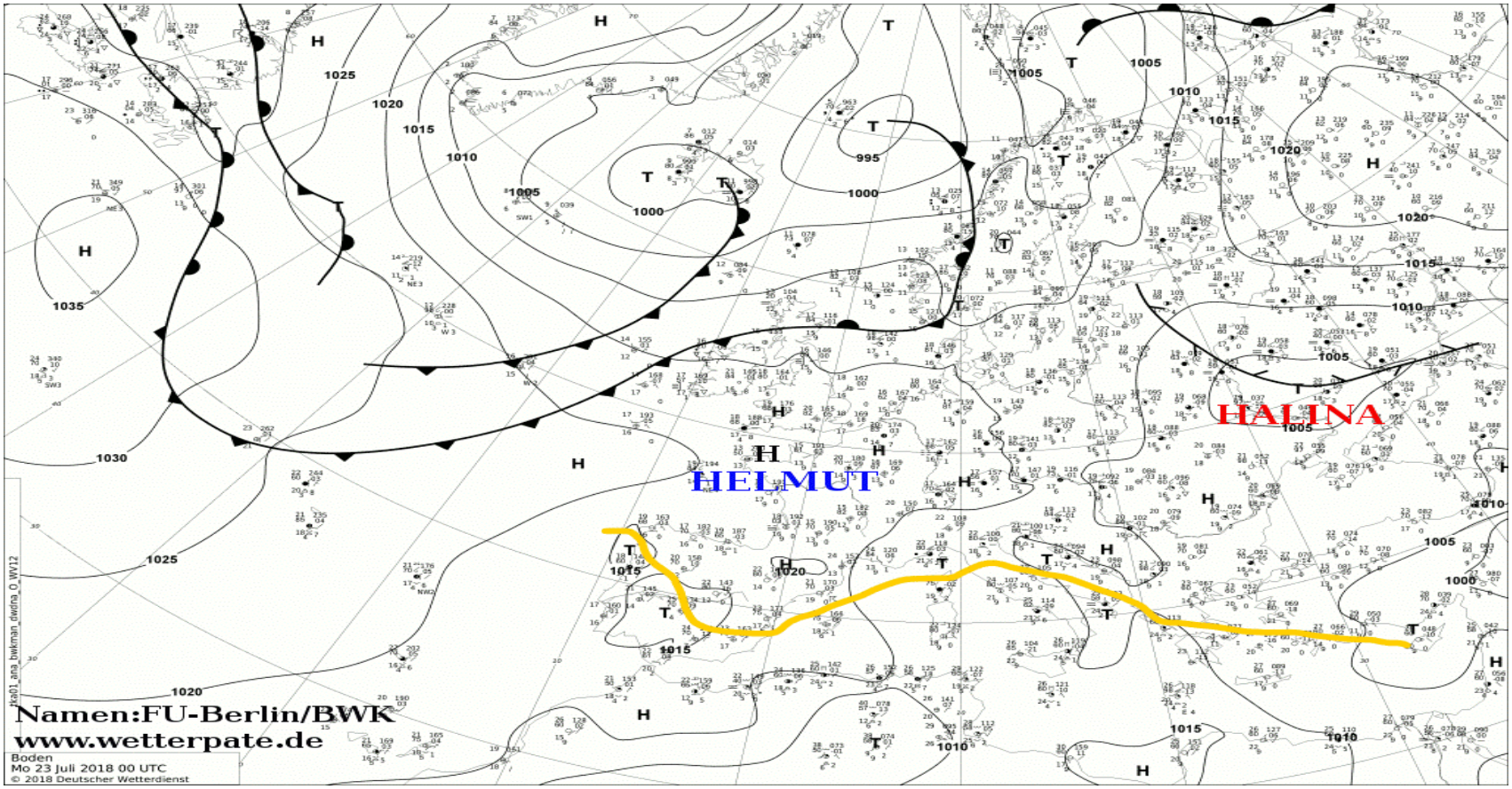

Рисунок 8 – Синоптическая карта в районе Средиземного моря с 17-22 июня 2018 года с траекторией движения циклона [20]

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных о случаях и местах наблюдавшихся метеорологическое цунами в Средиземном море, из архива [20] были выбраны наборы приземных синоптических карт за соответствующие даты.

С помощью синоптических карт были определены координаты начала движения и эволюции циклона и намечены координаты островов и заливов, наиболее подверженных воздействию метеоцунами.

Как наиболее характерный, был выбран циклон IMELDA, который проходил над Средиземным морем 23-27 июня 2014 года.

Далее в программном комплексе CARDINAL был задан циклон, с параметрами близкими к параметрам циклон IMELDA, который проходил над средиземноморским побережьем Франции. За начало движения была выбрана точка с координатами 43°с.ш., 3°в.д.

Были выделены места с наиболее вероятным затоплением, рассчитаны скорость и траектория движения циклона. Изолинии давления и скорость ветра в таком циклоне рассчитываются аналитически в программном комплексе CARDINAL [1,7,8].

3.1 Пошаговый анализ формирования метеоцунами в программном комплексе CARDINAL

Для определения экстремального подъема воды задавался циклон со следующими параметрами: разность давления между центром и периферией циклона (перепад давления) – δP_0 = 57 мб (от 953 до 1010 мб) с радиусом максимального ветра – r_T = 390 км [9]. Максимальный лапласиан давления в таком модельном циклоне при шаге 250 км равен 56 мПа/км^2. Максимальная скорость ветра в таком циклоне достигает 42 м/с. Пример поля ветра показан

на рисунке 9.

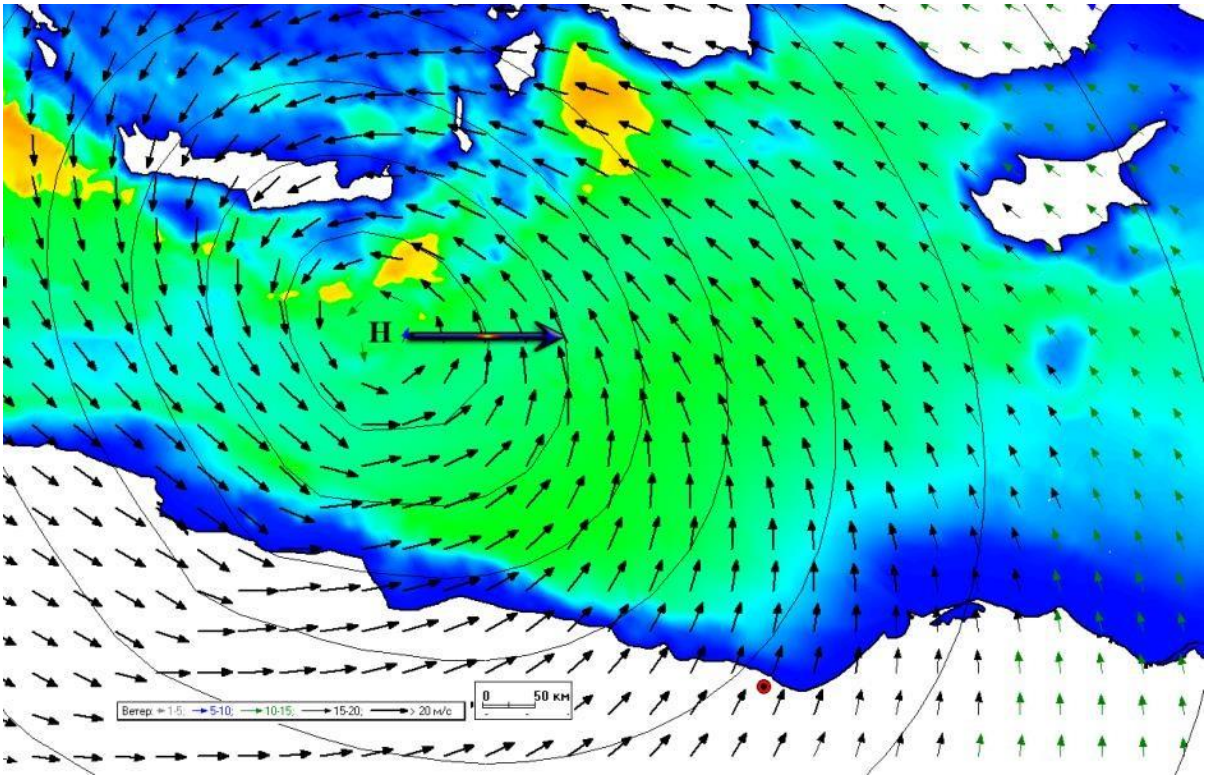

Рисунок 9 - Пример полей ветра и давления в движущемся экстремальном модельном циклоне [9]

Важным параметром модельного циклона является время «развития» или «углубления» циклона до достижения минимального давления в центре ΔT.

Расчеты проходили при задании максимального значения ΔT равного 78ч.

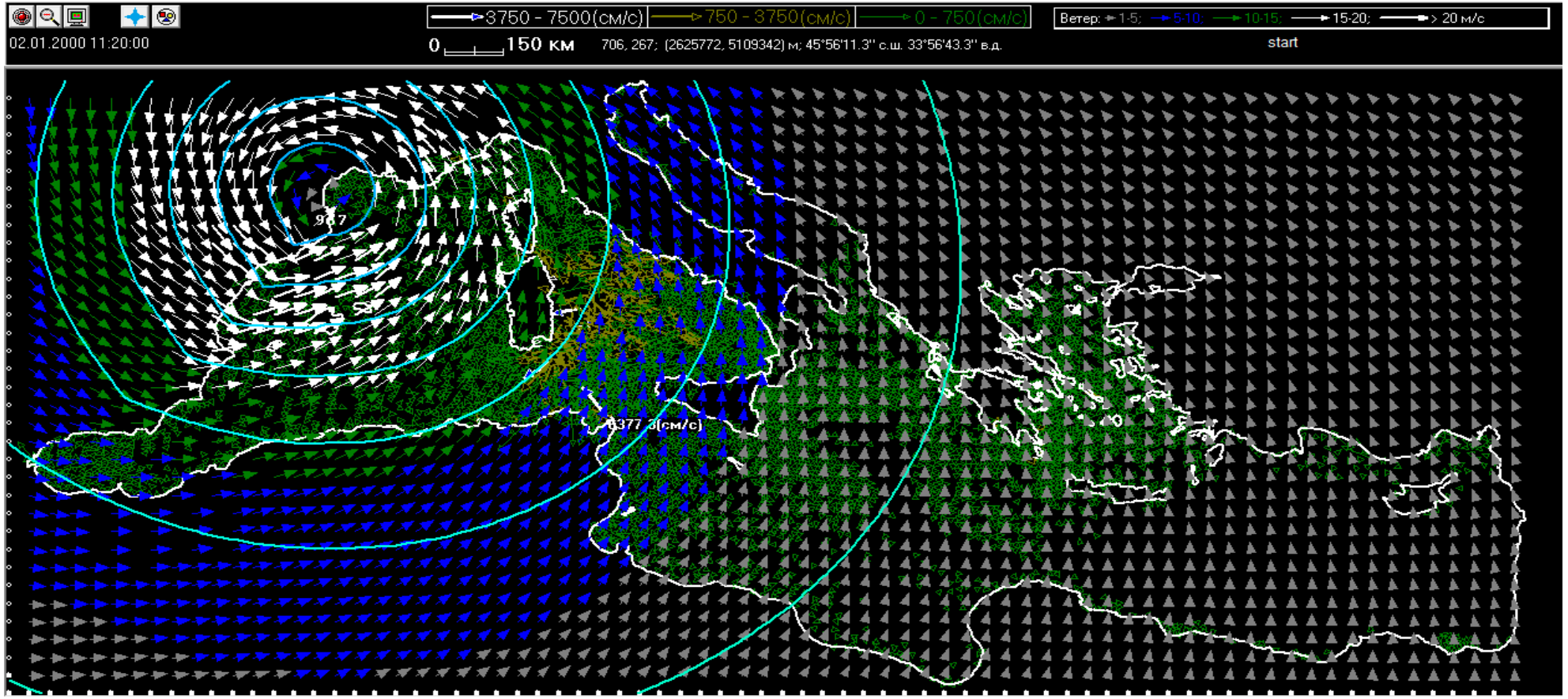

Рисунок 10 – Центр стационарного циклона расположенный в точке 43° с.ш., 3° в.д. Параметры циклона δP_0 = 57 мб, ΔT=78 ч, Макс. лапласиан давления 56 мПа/км^2, r_T = 390 км, T_o=24 ч

На рисунке 10 показан стационарный циклон, с начальными координатами 43^{o} с.ш., 3^{o} в.д, который вызвал резкие скачки атмосферного давления, при смещении вдоль береговой линии и над территорией Франции.

Для моделирования метеоцунами был запущен на счет модельный циклон с указанными выше параметрами (рис.11-13). Давление центра циклона в начальном его развитии составляло 1005 гПа.

Расчетное время циклона до прохождения Балеарских островов составило примерно 16 часов. Циклон стремительно углублялся, ветер усиливался. Примерно через 18 часов после начала развития циклона, давление составило 1002 гПа. Это соответствует примерно состоянию реального циклона IMELDA на 24.06.2014 г. Уровень моря оставался прежним, колебания составили от 10 см до 1 метра.

Далее ветер в циклоне начинает распространяться в сторону острова Менорка, где циклон принес разрушительные волны метеоцунами в бухту Сьютаделлья (рис.13). На рисунках 14-15 видно, что циклон начинает углубляться и смещаться на восток.

Уже через день на о. Сицилия, на берег в порту Мазарро-дель-Вальо обрушится нагон с высотой волн около 2-х метров (рис.16). Давление в центре циклона будет равно примерно 998 гПа.

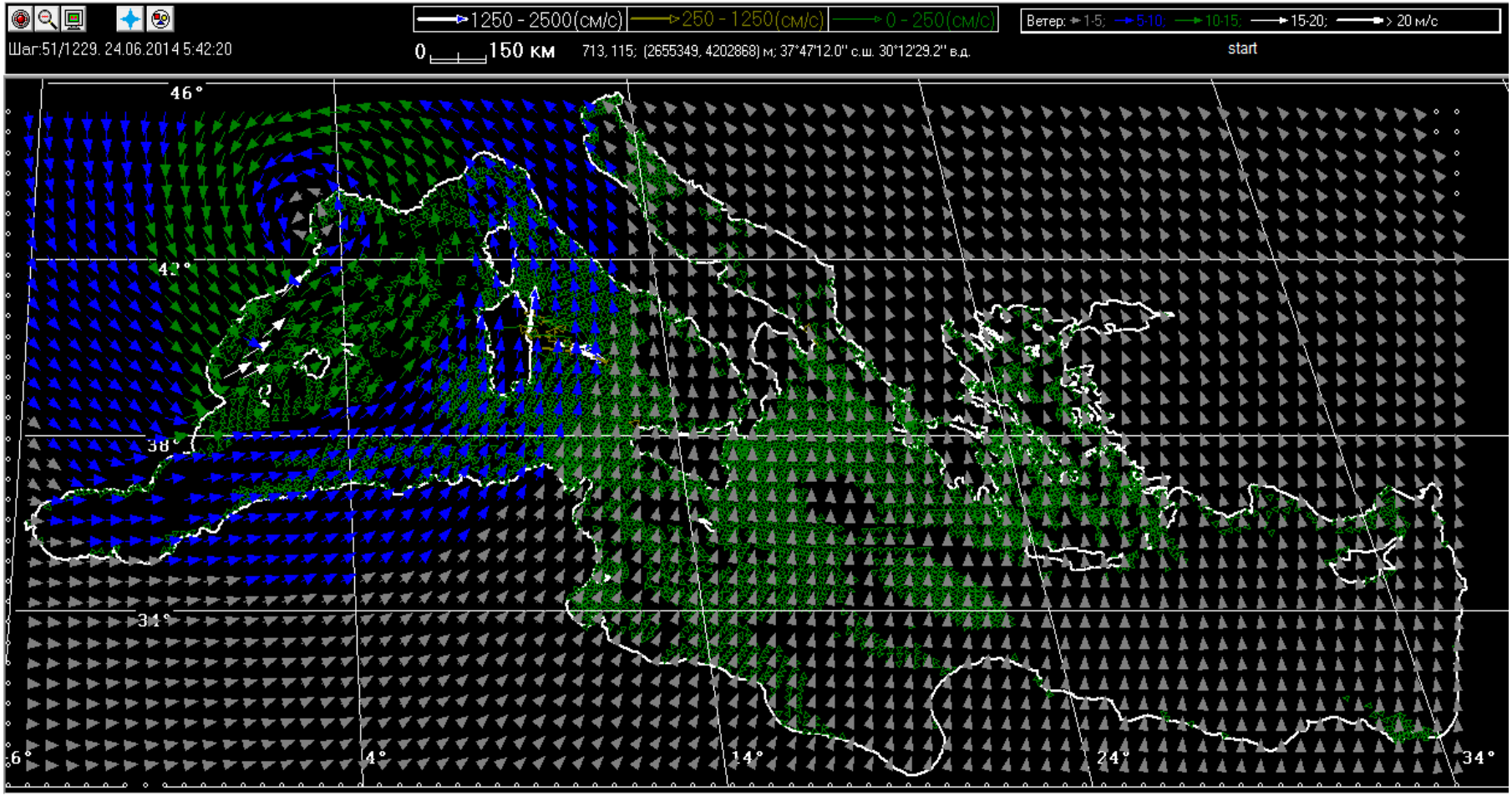

Рисунок 11 - Зарождение циклона от 24.06.2014 в 05:42 утра

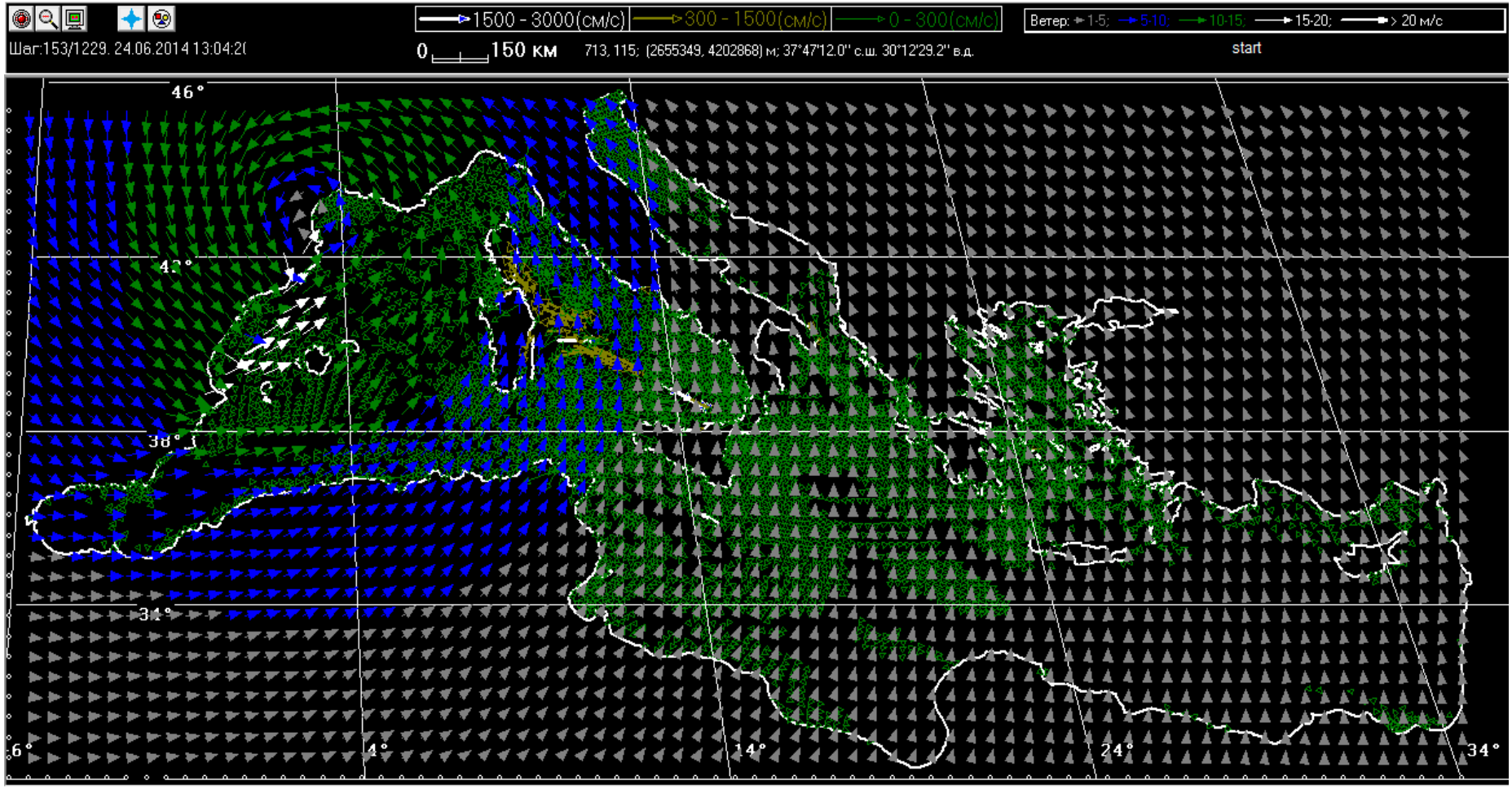

Рисунок 12 - Усиление западных ветров в исследуемом районе. Скорость ветра 20 м/с.

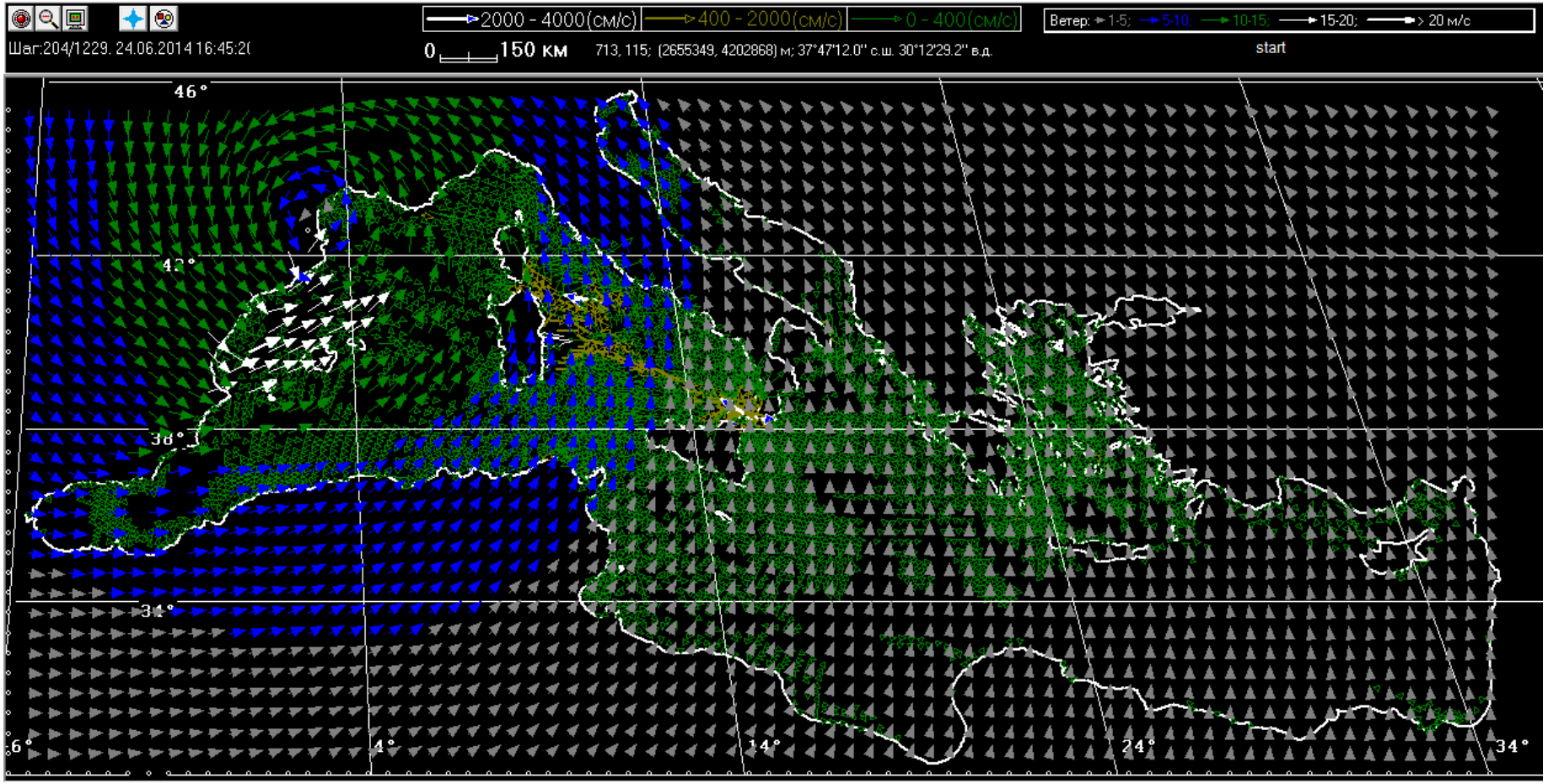

Рисунок 13 – Прохождение усиленного ветра над Балеарскими островами в 16:45 часов

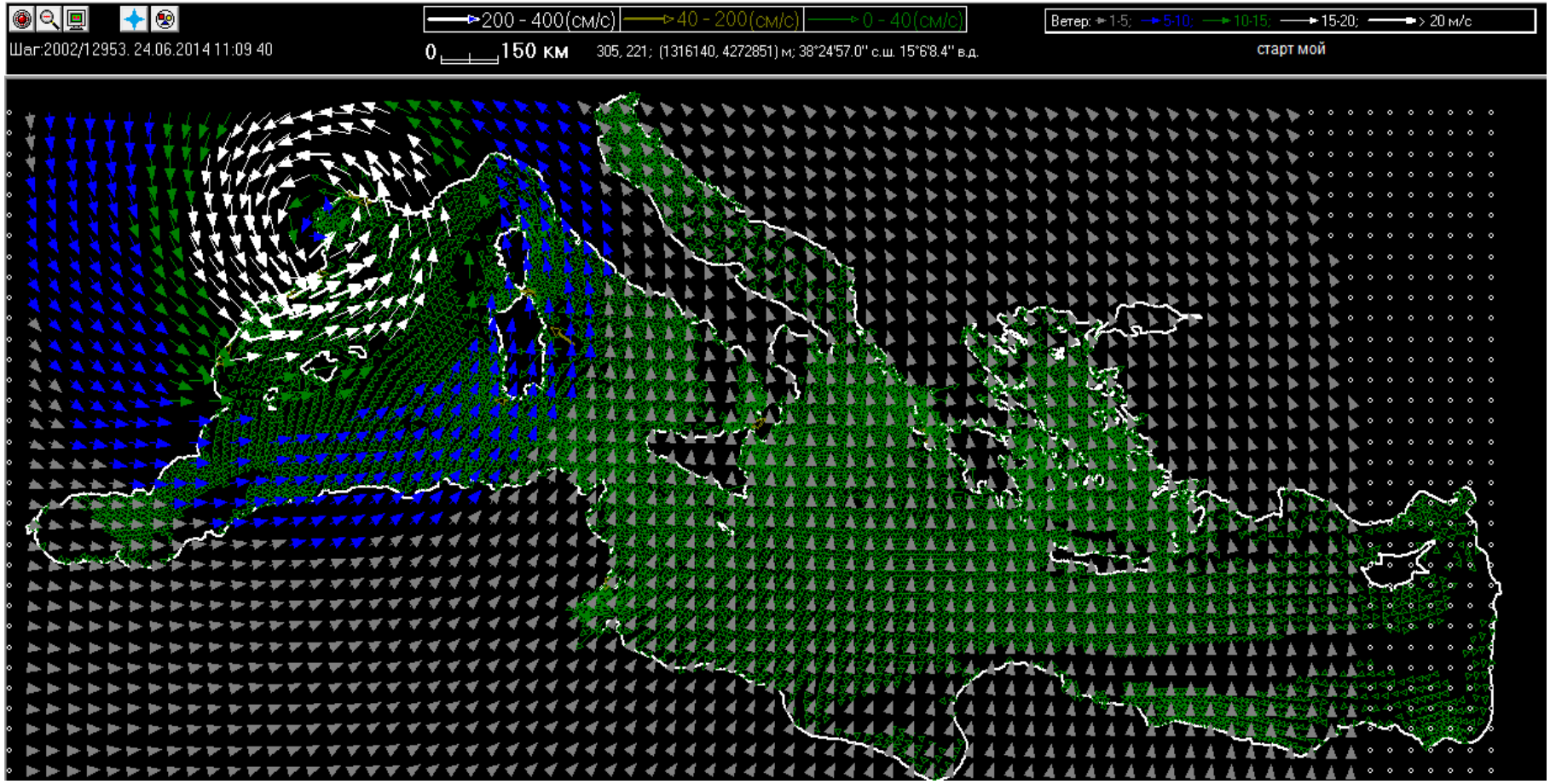

Рисунок 14 – Циклон наблюдается над северо-западной частью Средиземного моря

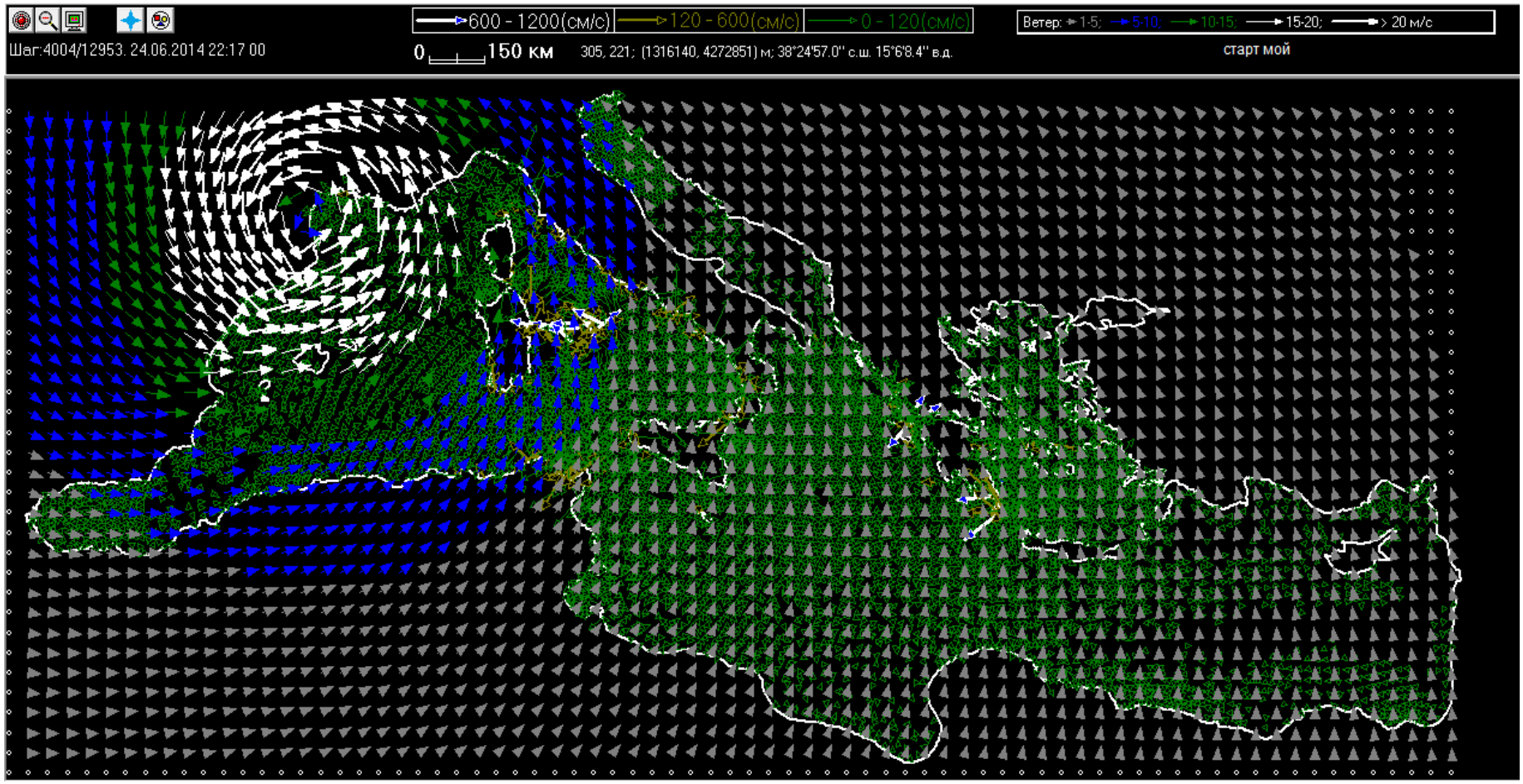

Рисунок 15 - Циклон надвигается на Балеарские острова. Время 22:17

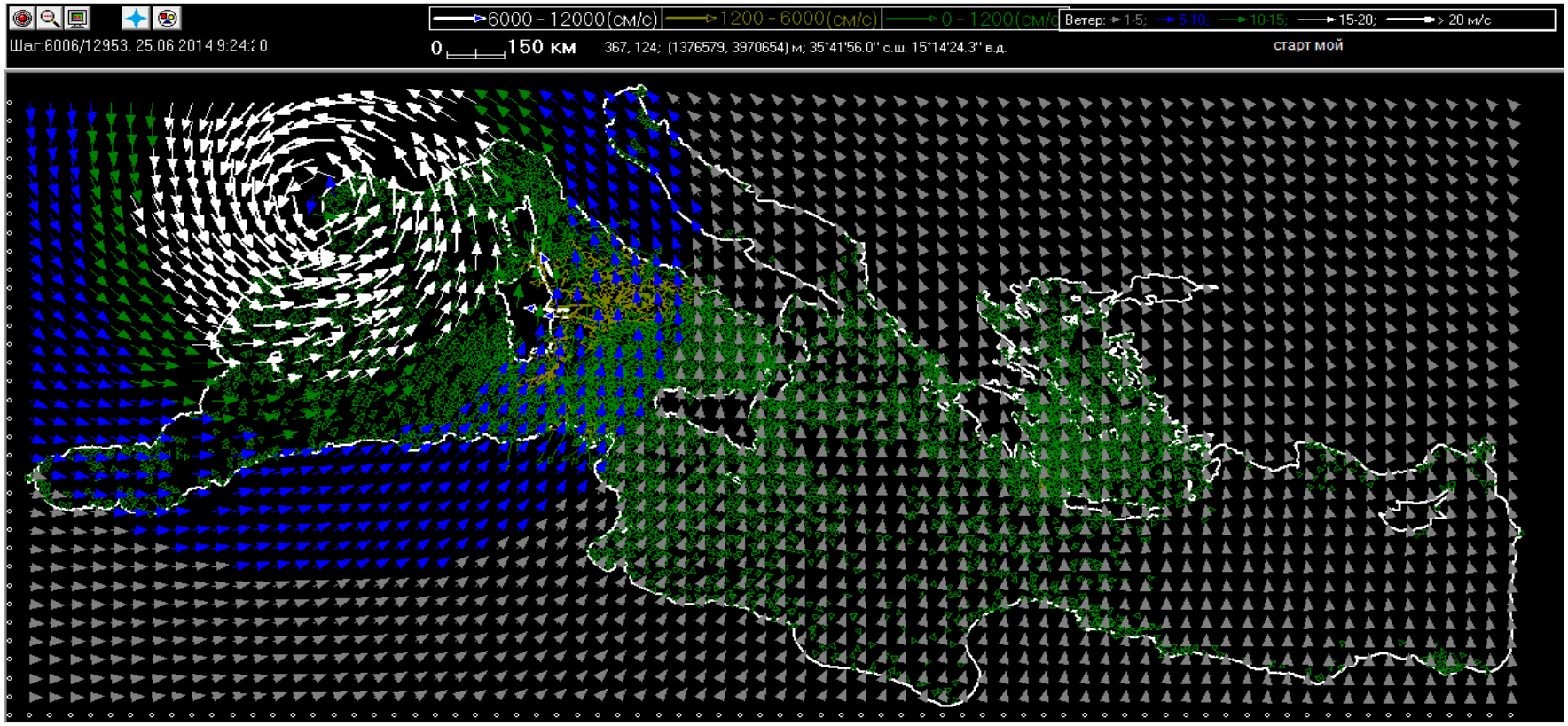

Рисунок 16 – Распространение ветров более 20 м/с в сторону о.Сицилия Италия

25 июня обрушился метеоцунами в порту Мазарро-дель-Вальо, о.Сицилия

3.2 Анализ временного хода колебаний уровня на о.Менорка

В программном комплексе CARDINAL был установлен условный прибор, который фиксирует изменения уровня моря. Для моделирования циклона, который проходил 24-25 июня над Балеарскими островами, была выбрана бухта Сьютаделлья.

Бухта располагается в юго-западной части острова Менорка. Координаты точки в которой был произведен расчет 39º56'10.3" с.ш 3º42'45" в.д. Расчет происходил в условных часах и днях от начала развития циклона.

Рисунок 17 – Расположение бухты Сьютаделлья, о. Менорка [19]

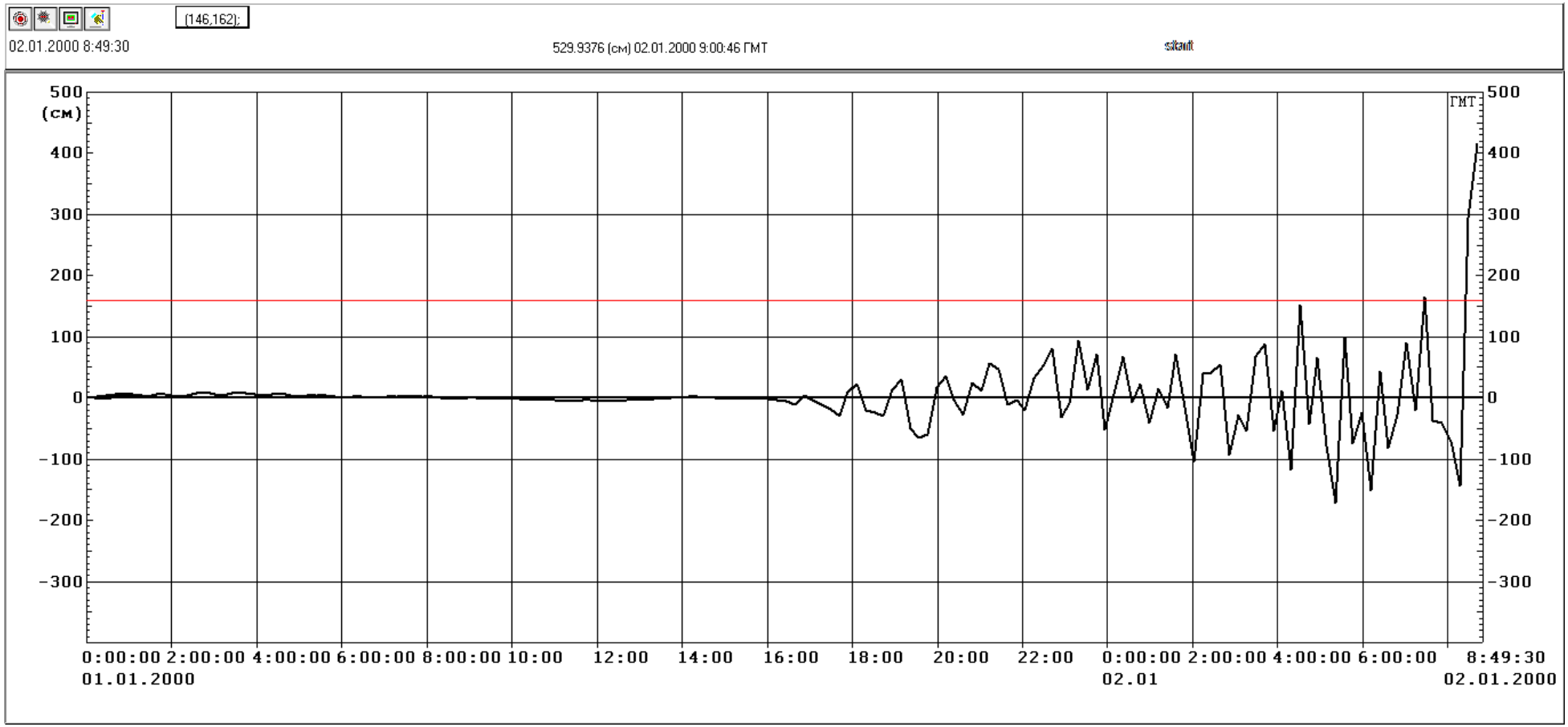

Рисунок 18 – Расчетный временной ход уровня (см) над Балеарскими островами при максимальном подъеме уровня

Образовавшийся циклон принес в бухту Сьютаделлья волны высотой примерно 3-4 метра. На рисунке 18 видно, что при начале развития циклона уровень воды колеблется не значительно. Примерно за 17,5 час от начала условной даты 01.01.2000 уровень колебался от 0 до 2 м, снижаясь до отрицательных значений (рис.19).

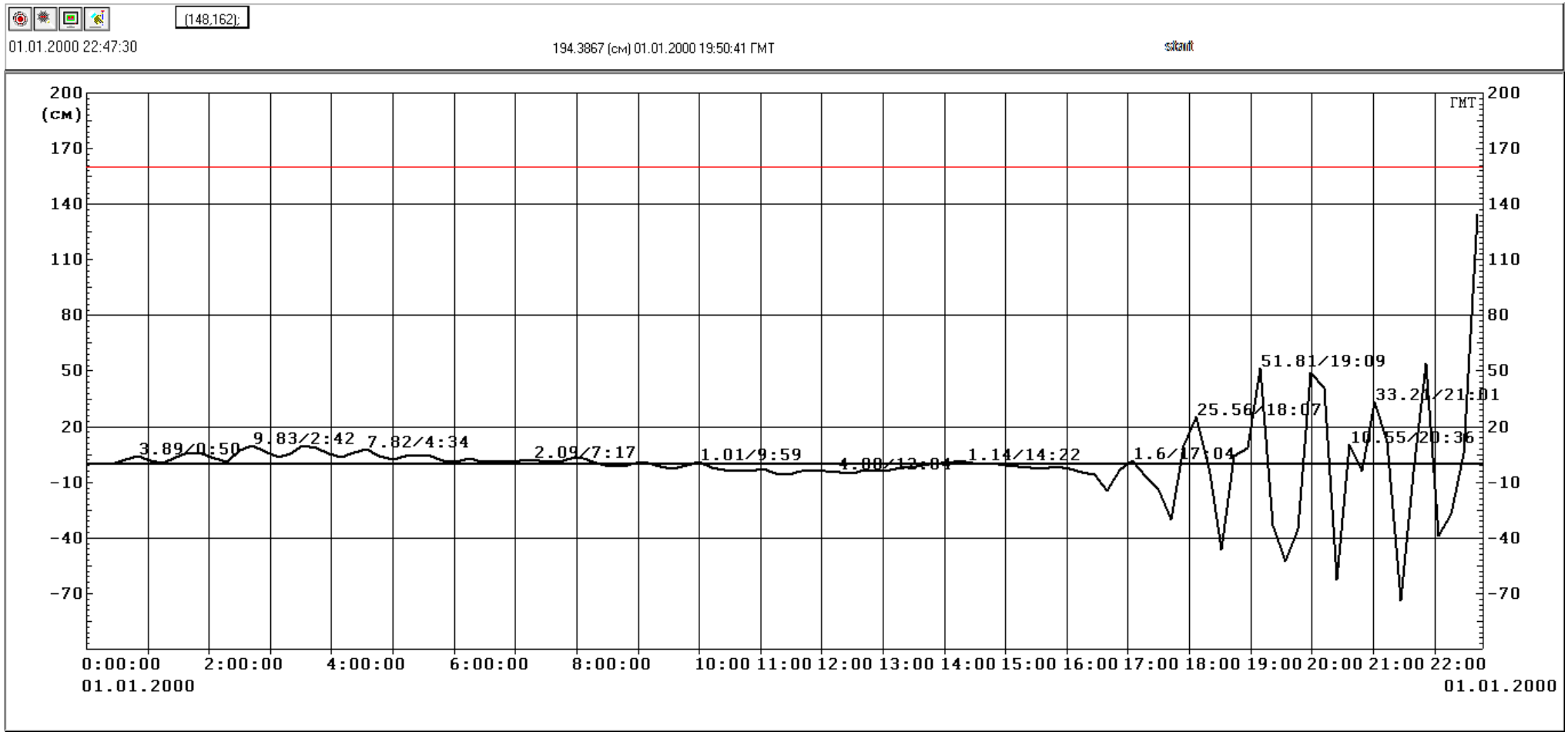

Рисунок 19 – Временной ход уровня (см) за 22 часа от начала развития циклона

На рисунке 19 отчетливо видно, что в 22:47 колебание уровня воды возрастает до отметки в 1,3 метра. И далее возвращаясь к рисунку 18 можно увидеть, как колебания волн резко падают на отметку -1,7 м.

Через несколько часов они достигают отметки 1м, а далее через несколько шагов уходят на -1,5 м. После можно заметить, как уровень воды резко возрастает на 4 м.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что эти значительные скачки уровня моря являются моделью метеорологического цунами, которое обрушилось на бухту Сьютаделлья и нанесло сильный ущерб жителям острова.

3.3 Анализ временного хода колебаний уровня о.Сардиния

Далее был произведен экспериментальный расчет временного хода уровня у берегов острова Сардиния. По данным из источников литературы, которая была мною изучена, на остров Сардиния также было обрушено метеорологическое цунами, далее так как оно пошло юго-восток, достигнув берегов о. Сицилии [36].

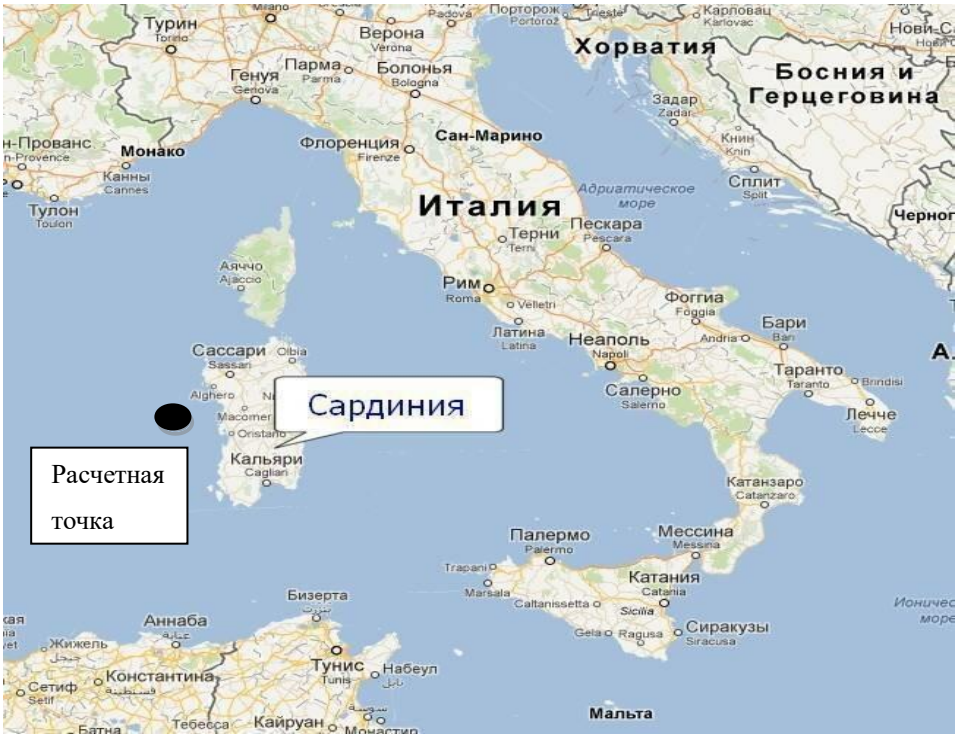

Рисунок 20 – Расположение острова Сардиния [23]

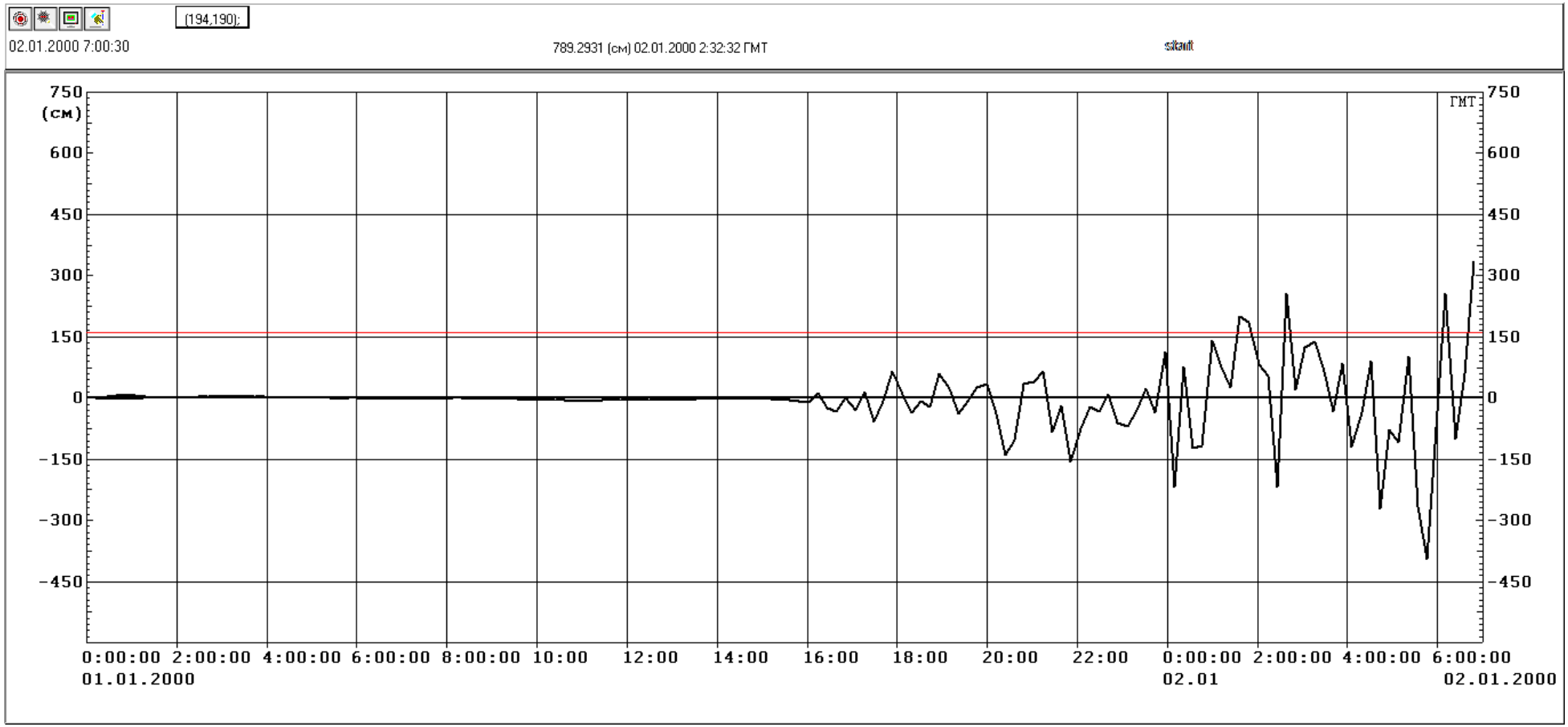

Рисунок 21 – Временной ход уровня (см) о. Сардиния

На рис.21 видно, что при начальном движении циклона, колебания уровня практически не значительны. Но далее по ходу движения колебания уровня воды достигли практически 3,3 метра. По этим данным, можно сделать вывод, что метеорологическое цунами продвинулось с Балеарских островов на юго-запад к острову Сардиния.

3.4 Анализ временного хода колебаний уровня о. Сицилия

Также метеоцунами наблюдаются на южном и западном берегах острова Сицилии. Жители острова называют такие метеоцунами «марроббио». Перевод этой фразы означает «ограбленные морем».

Влиянию марроббио усиленно подвергаются бухты и заливы рядом с городами Марсала и Мазала-дель-Валло. И немного реже подвергается остров Лампедуза, который располагается между Мальтой и Африкой.

Очевидно, что благодаря научным исследованиям, на сегодняшний момент жители Средиземноморья знают о метеоцунами. Недавно на Балеарских островах стала работать система предупреждения о возникновении волн риссага [36].

Ученые в области океанологи в нескольких городах Хорватии в настоящее время работают над системой предупреждения о метеоцунами (MWN). Данная система имеет приборы за наблюдением прибрежной зоны, атмосферного давления и волнения. Эти измерительные приборы передают данные на центральный пост.

Данные приборы улавливают изменение атмосферного давления в пределах 1 гПа в течение 1 минуты. Тем самым, это может служить сигналом для тревоги.

Благодаря этому, жителей города Стари-Град будут предупреждать о возникновении метеоцунами за 20–25 минут. Жителей города Вела-Лука

смогут предупреждать за 10-20 минут до возникновения метеоцунами. Это, безусловно, немного, но все многие капитаны смогут убрать свои судна в безопасное место [36].

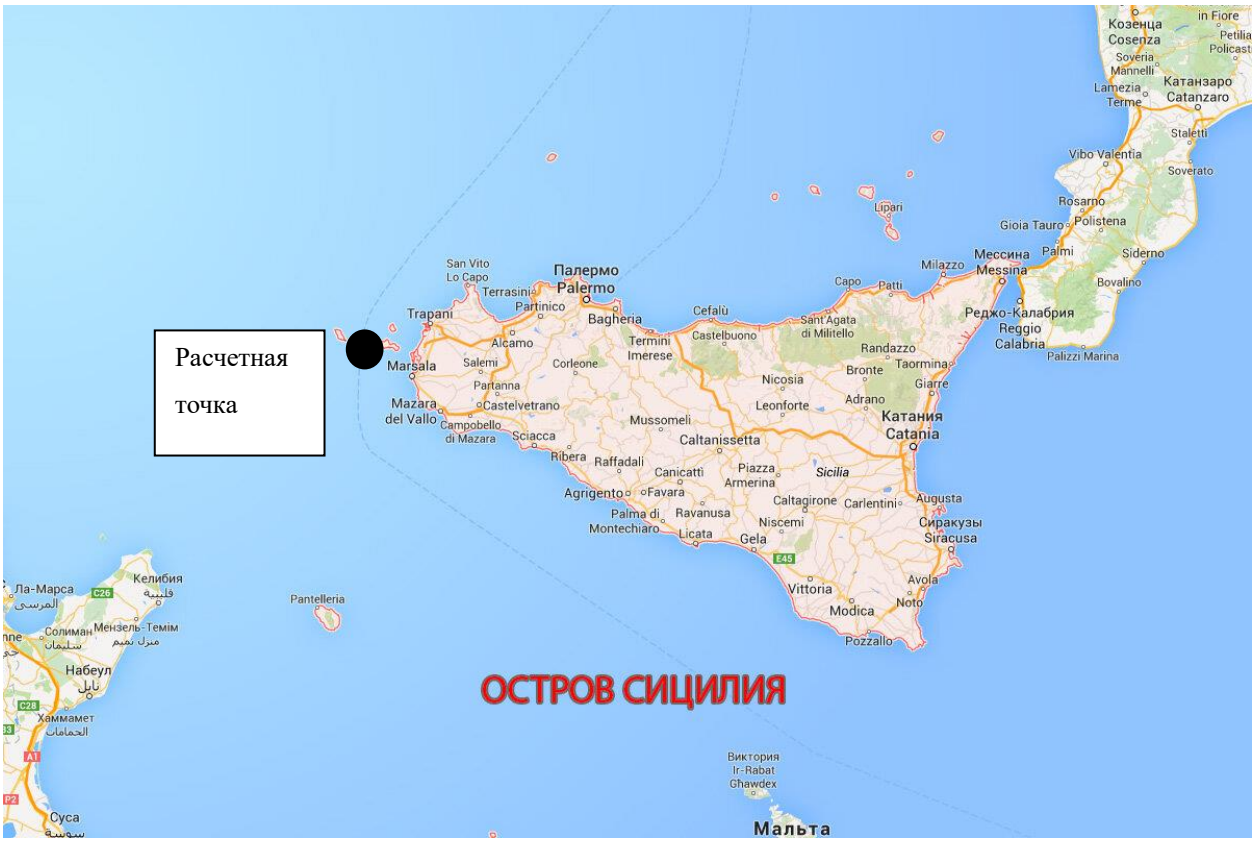

Рисунок 22 – Расположение острова Сицилия [24]

На рисунке 23 видно, что колебания уровня воды возрастают примерно до 4 метров. Очевидно, что такой скачок воды обрушится на берег и разрушит пляжи и судна.

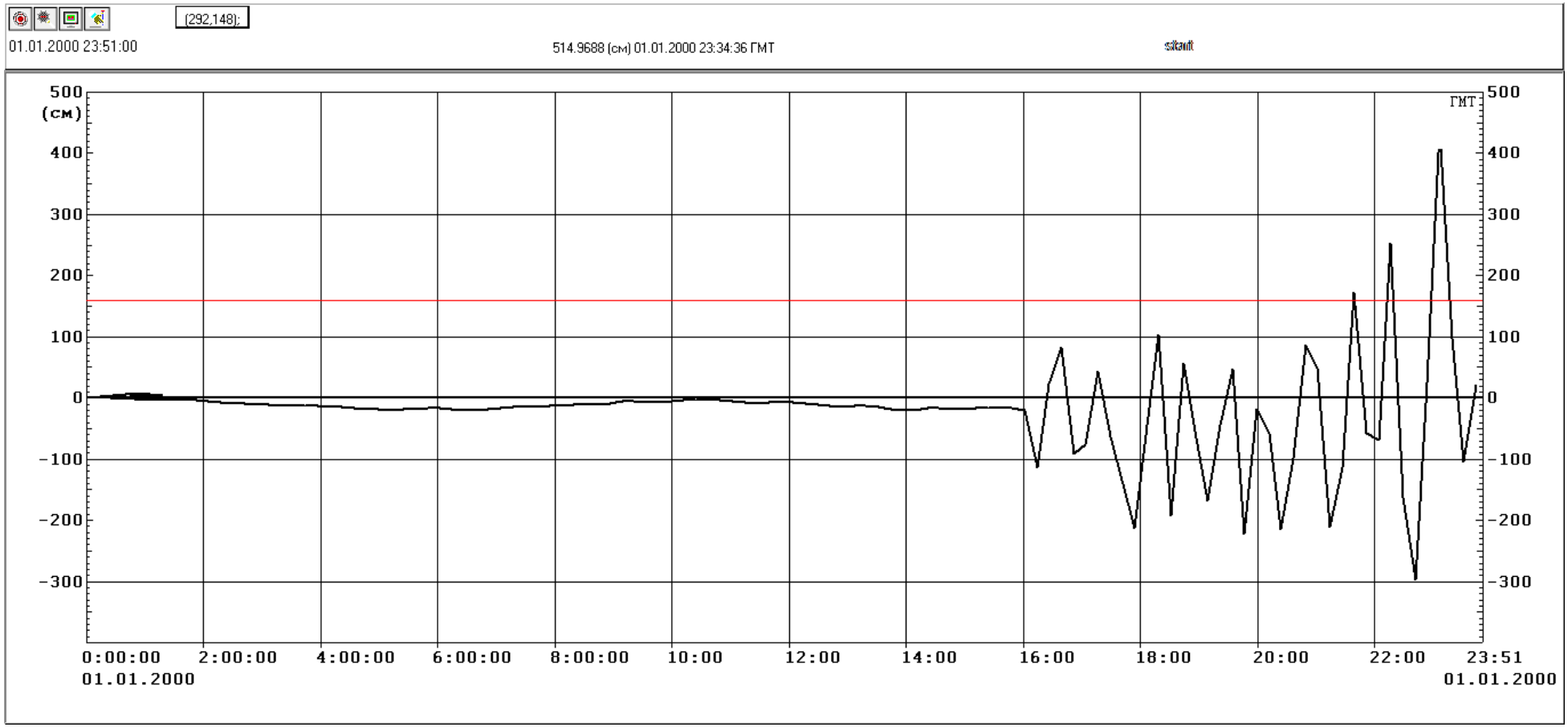

Рисунок 23 – Временной ход уровня (см) на о. Сицилия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метеорологическое цунами опасное морское явление, вызывающее значительные, а иногда катастрофические колебания уровня в бухтах и заливах. Наблюдаются в Средиземном, Адриатическом, Белом, Охотском, Черном морях, также на Великих озерах в США.

Метеоцунами возникают в результате резонанса собственных колебаний относительно небольшого бассейна и длинной волны или группы волн (цуга), приходящих из другой, обычно значительно удаленной акватории. Там исходный импульс вызван статическим или нагонным подъемом уровня в результате действия интенсивного циклона.

С целью изучения некоторых механизмов формирования метеорологических цунами были изучены случаи проявления этого явления в Средиземном море. Затем были подобраны синоптические карты из берлинского архива за соответствующие даты и заданы параметры экстремального модельного циклона, который мог бы вызвать колебания уровня в определенных акваториях, напоминающих метеоцунами.

Наиболее близкие параметры были у циклона IMELDA, наблюдавшегося 23-27 июня 2014 года и вызвавшего значительные разрушения в бухте Сьютаделлья, у берегов Хорватии и в Одессе.

Проведены серии численных экспериментов с модельным циклоном и отслежен временной ход уровня в точках с координатами

39º56'10.3" с.ш 3º42'45" в.д – бухта Сьютаделлья;

39º15'00" с.ш 9º4'30.1" в.д – о. Сардиния;

38º00'46.4" с.ш 12º22'37.3" в.д – о. Сицилия.

Эксперименты показали, что циклон с перепадом давления 57 мб между центром и периферией и скоростью ветра до 40м/с на удалении 390 км от центра, находящийся в точке с координатами 39º56'10.3" с.ш 3º42'45" в.д, вызывает колебания уровня в бухте Сьютаделлья до 4,3 м.

Колебания уровня типа цунами вблизи острова Сардиния, с координатами в исследуемой точке 39º15'00" с.ш 9º4'30.1" в.д, достигают 3,3 метра. А также колебания уровня на юго-западном побережье острова Сицилия, с координатами в исследуемой точке 38º00'46.4" с.ш 12º22'37.3" в.д, достигают 4 метров.

Необходимо отметить, что учтены не все механизмы, вызывающие метеорологическое цунами, можно предположить, что в реальных условиях колебания уровня могут достигать больших величин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Аверкиев А.С. Оценка влияния циклонической активности на колебания уровня воды в Невской губе.- Ученые записки РГГМУ, № 18, 2011.-с. 100-111

2. Аверкиев А.С. Особенности штормовых нагонов в Финском заливе, формируемых экстремальными циклонами, во время работы Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений// Фундаментальная и прикладная гидрофизика, т.7, № 4, 2014.- с. 29-39 (Scopus ИФ РИНЦ 0,175)

3. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России. Изв. РАН Физика атмосферы и океана, 2014, т. 50, № 5, 578 – 590.

4. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л.Гидрометеоиздат, 1968, 300 с.

5. Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР. Тихоокеанский ежегодник, Владивосток: ДВО АН СССР, 1989, 9-17.

6. Долгих С.Г. Геосферные особенности проявления метеоцунами.СПб., 2019-с.109

7. Клеванный К.А., Аверкиев А.С. Моделирование экстремальных колебаний уровня в Финском заливе и учет влияния комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.- В кн. Основные концепции современного берегопользования. Том 3, 2011.- С. 10-24.

8. Клеванный К.А. Руководство пользователя ПК CARDINAL// СПБ.,2019, 219 с.

9. Клеванный К.А. Отчет АЭС Эль Даба. СПБ., 2016 , 117 с.

10. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами. Москва: Янус-К, 2005

11. Марчук Г.И., Каган Б.А. Динамика океанских приливов, Л., Гидрометеоиздат, 1991, 470.

12. Никонов А. А., Флейфель Л. Д. Цунами в Одессе: природный или рукотворный феномен? // Природа. 2015. № 4. С. 36–43.

13. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.

14. Праудмен Дж. Динамическая океанография. М., 1957.

15. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб., 1993.

16. Рабинович А.Б. Метеорологические цунами: что это такое? / Рабинович А.Б, Шепич Я. // Природа. 2016. №1 с.12-26

17. Рабинович А. Б., Монсеррат С., Файн И. В. Численное моделирование экстремальных сейшевых колебаний в районе Балеарских островов // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 16–24.

18. Соркина А.И. Построение карт ветровых полей для морей и океанов. - Труды ГОИН, 1958, вып. 44, 73 с.

19. Бухта Сьютаделья, Средиземное море. Режим доступа: https://yandex.ru/maps/?from=tabbar&ll=4.224824%2C39.964802&mode=search&oid=140931833097&ol=biz&sctx=ZAAAAAgBEAAaKAoSCUB2D7fggiVAEehA%2F9JchERAEhIJncqSzvpCNkARpM21ixCmIkAiBQABAgQFKAowADjXr8DboMDw%2FMMBQPCoAUgBVc3MzD5YAGoCcnVwAJ0BzcxMPaABAKgBAL0BDjHOxw%3D%3D&sll=4.224824%2C39.964802&source=serp_navig&sspn=1.054448%2C0.448921&text=%D0%B1%D1%83%D1%85%D1%82%D0%B0%20%D0%A1%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%8F&z=10.2 – свободный. Дата обращения 29.05.2020

20. Карты атмосферного давления над Средиземным морем. Режим доступа: www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps/ - свободный. Дата обращения 07.05.2020

21. Карты Средиземного моря: расположение, страны и острова. Режим доступа: https://vsya-planeta.ru/sredizemnoe-more-karty/ - свободный. Дата обращения 10.05.2020

22. Карта Балеарских островов Средиземноморя. Режим доступа: https://yandex.ru/images/search?text=%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%B0%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B2&lr=24 – свободный. Дата обращения 29.05.2020

23. Карта острова Сардиния Средиземного моря. Режим доступа: https://yandex.ru/images/search?text=%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%20%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D1%81%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F&lr=24 – свободный. Дата обращения 29.05.2020

24. Карта острова Сицилия Средиземного моря. Режим доступа: https://yandex.ru/images/search?text=%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%20%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D1%81%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D1%8F&lr=24 – свободный. Дата обращения 29.05.2020

25. Карта географии Средиземного моря. Режим доступа: https://yandex.ru/maps/?from=tabbar&ll=33.254315%2C48.963314&mode=search&sll=33.254315%2C46.891727&source=serp_navig&text=%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F%20%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%8F&z=3 – свободный. Дата обращения 29.05.2020

26. Карта Средиземного моря. Режим доступа: https://wikiway.com/turkey/sredizemnoe-more/map/ - свободный. Дата обращения 20.04.2020

27. Мини-цунами: японская болезнь Адриатики. Режим доступа: https://www.yachtrussia.com/articles/2016/03/18/articles_280.html - свободный. Дата обращения 10.06.2020

28. Природа мира, география и история моря. Режим доступа: https://yandex.ru/turbo/s/natworld.info/raznoe-o-prirode/sredizemnoe-more-geografija-istorija-jekologija-i-strany - свободный. Дата обращения 02.06.2020

29. Средиземное море. Режим доступа: https://science.wikia.org/ru/wiki/%D0%A1%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BC%D0%BE%D1%80%D0%B5 – свободный. Дата обращения 27.04.2020

30. Средиземное море. Режим доступа: https://wikiway.com/turkey/sredizemnoe-more/ - свободный. Дата обращения 02.06.2020

31. Средиземное море: описание, история, интересные факты. Режим доступа: http://isradag.ru/polezno-znat/sredizemnoe-more-opisanie-istoriya-interesnye-fakty.html-свободный. Дата обращения 11.03.2020

32. Энциклопедия Кругосвет. Режим доступа: https://www.krugosvet.ru/enc/Earth_sciences/geografiya/SREDIZEMNOE_MORE.html?page=0,1 – свободный. Дата обращения 22.04.2020.

33. Vilibić I, Šepić J. Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: overview // *Phys. Chem. Earth.* 2008. V. 34. № 17–18. P. 904–917.

34. Monserrat S., Vilibić I., Rabinovich A. B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006. V. 6. P. 1035–1051.

35. Soloviev S.L., Solovieva O.N., Go Ch.N., Kim Kh.S., Schetnikov N.A. Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C. – 2000 A.D. Kluwer, 2000.

36. Rabinovich A. B., Monserrat S. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril islands: Descriptive and statistical analysis // *Natural Hazards*. 1996. V. 13. № 1. P. 55–90

37. Rabinovich A. B., Monserrat S. Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril islands // *Natural Hazards*. 1998. V. 18. № 1. P. 27–55.

38. Rabinovich A. B. Seiches and harbour oscillations // Handbook of coastal and ocean engineering / Ed. Y. C. Kim. Singapore, 2009. P. 193–236.