

А.А.Полозок<sup>1,2</sup>, Е.Е.Лемешко<sup>1</sup>, И.Н.Фомина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

<sup>2</sup>Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова, г.Севастополь

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ ЗА ПЕРИОД 1995 – 2014 ГГ.

Представлен статистический анализ срочных данных уровня моря, полученных на МГС Таганрог за 2005 – 2014 гг., в том числе рассчитаны базовые статистические характеристики анализируемых рядов и коэффициент линейного тренда. Проведен сравнительный анализ полученных статистических показателей с соответствующими значениями сводной статистики за период 1995 – 2004 гг. Сделаны выводы по тенденциям изменчивости рядов срочных данных. Дана характеристика опасным сгонным и нагонным процессам и явлениям, зафиксированным вблизи указанной морской береговой станции за рассматриваемый период. Получена оценка линейного тренда годовых максимумов уровня моря и рассчитана кривая обеспеченности максимальных и минимальных годовых высот уровня моря в Таганроге, превышающих самый низкий годовой максимум, за период 1995 – 2014 гг. Произведена оценка повторяемости экстремальных значений уровня моря. Выявлено, что период 2005 – 2014 гг. характеризуется большей частотой экстремальных штормовых нагонов по сравнению с периодом 1995 – 2004 гг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нагоны, сгоны, штормовые ситуации, уровень моря, измерения уровня, МГС Таганрог

doi: 10.22449/2413-5577-2019-1-62-70

Таганрогский залив – самый крупный на Азовском море. Протяженность залива по параллели составляет 140 км. Наибольшая ширина достигает 52 км, наименьшая (около 26 км) отмечена между косами Петрушиной и Чумбурской. Режим уровня Таганрогского залива определяется [1 – 5]: атмосферными воздействиями; расходом воды реки Дон; притоком черноморских вод и водообменом с центральной частью Азовского моря. Наибольшая среднемесячная высота уровня воды (492,6 см) по данным многолетних наблюдений бывает в июне, а наименьшая (454,9 см) – в ноябре – декабре [6]. Значительно большие и резкие колебания уровня происходят под влиянием нагонных и, главным образом, сгонных ветров [1 – 5]. Во время отдельных сильных сгонов понижение уровня воды в районе Таганрога достигает 1,5 – 2 м. При нагонных ветрах высота подъема уровня воды составляет в среднем 2 м.

Кроме Таганрогского залива сгонно-нагонные процессы оказывают значительное влияние на дельту р.Дон [7 – 9]. Ветры с западной составляющей вызывают нагон воды из Таганрогского залива и подъем уровня в р.Дон, ветры с восточной составляющей вызывают сгон воды и падение уровня. Подробная типизация ветровых ситуаций и их влияние на повторяемость сгонно-нагонных явлений изложены в [4].

© А.А.Полозок, Е.Е.Лемешко, И.Н.Фомина, 2019

*Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.1. С.62-70.*

Штормовые сгонно-нагонные явления вызывают значительные вариации уровня моря в результате изменения приземного атмосферного давления и действия ветров сгонно-нагонных направлений с ориентацией в сторону берега или под углом к нему и связаны обычно с прохождением циклонов. Штормовые нагоны относятся к опасным природным явлениям, в некоторых районах могут вызывать затопление обширных низменных территорий, нанося вред сельскому хозяйству, вызывая разрушения жилых домов, объектов промышленности, складских помещений и береговой инфраструктуры.

Тенденции многолетней изменчивости штормовой активности, по данным береговых станций, свидетельствуют об общей тенденции снижения штормовой активности в Азово-Черноморском регионе за последние 50 лет, когда повторяемость сильных и штормовых ветров снизилась в среднем в два раза. Общее уменьшение скорости ветра сопровождалось уменьшением повторяемости умеренных (6 – 9 м/с) и сильных ( $\geq 10$  м/с) ветров и значительным увеличением повторяемости слабых (2 – 5 м/с) ветров. С начала XXI в. в определенных районах моря и побережья вновь началось усиление ветра [1]. Снижение штормовой активности в Черном море, происходившее в период 60-х – 90-х гг., было связано с уменьшением общего количества и интенсивности проходящих циклонов, что сопровождалось хорошо выраженным ростом индексов Североатлантического и Восточноатлантического колебаний. После 90-х гг. данные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции имеют отрицательную тенденцию, в связи с чем можно ожидать увеличения количества штормов в регионе.

Анализ срочных данных уровня моря, полученных на береговых станциях Азовского моря, позволяет выделить условия возникновения штормовых сгонных и нагонных ситуаций [2]. Данная статья посвящена анализу срочных данных уровня моря в районе МГС Таганрог с целью получения статистических характеристик опасных сгонных и нагонных явлений, оценки повторяемости экстремальных значений уровня, сезонной и межгодовой изменчивости за период 1995 – 2014 гг.

**Исходные данные для анализа.** Исходными данными для статистического анализа являются ряды срочных шестичасовых данных уровня моря, полученные на МГС Таганрог за 2005 – 2014 гг. Для оценки динамики статистических показателей за указанный период проводится сопоставление этих значений со значениями, рассчитанными за период 1995 – 2004 гг.

Критериями выделения неблагоприятных и опасных штормовых ситуаций вблизи МГС Таганрог являлись: подъем уровня – НЯ (неблагоприятное явление): 670 см от нуля поста (170 см относительно БСВ), ОЯ (опасное явление): 705 см от нуля поста (205 см относительно БСВ); спад уровня – НЯ (неблагоприятное явление): 300 см от нуля поста (– 200 см в БСВ) и ОЯ (опасное явление): 200 см от нуля поста (– 300 см в БСВ).

**Метод анализа экстремальных значений уровня моря.** Применялся метод статистического анализа экстремальных значений уровня моря. Предложен способ расчета частоты штормовых нагонов\сгонов, в том числе выполнен подсчет количества штормовых ситуаций для разных градаций уровня (в случае отсутствия информации об опасной отметке уровня) и проведен расчет обеспеченности уровня моря, выборочных оценок регио-

нальной функции распределения экстремальных уровней и уровней редкой повторяемости. Этот подход основан на методе Лангбейна, который позволяет рассчитать период повторяемости  $T$  лет по выборке, составленной из данных значений уровня моря, превышающих произвольно выбранный базисный уровень [10].

**Статистический анализ исследуемых рядов.** Следует выбрать, какие именно экстремумы нам нужны: ежемесячные (с повторяемостью раз в месяц), или ежегодные, или все максимумы (или минимумы) с высотой уровня выше (или ниже) какой-то отметки. Наиболее часто используются ежегодные и ежемесячные экстремумы. В зависимости от способа формирования статистических выборок экстремальных значений функции распределения могут различаться. В этом смысле большое значение имеет соотношение, полученное Лангбейном [10], которое устанавливает пределы соответствия между распределениями вероятности годовых максимумов уровня и вероятности превышения определенного значения уровня, построенной по соответствующей выборке максимальных значений. Получается, что при  $N/m' \geq 10$  эти оценки различаются мало. Здесь  $N$  – общее количество лет наблюдений,  $m'$  – количество значений высоты уровня моря, превышающих наперед заданное ее статистическое значение (усеченная выборка). Для периодов повторяемости 10 лет разница между этими оценками вероятности достигает 5 %. Именно поэтому были выбраны два периода по 10 лет: 1995 – 2004 гг. и 2005 – 2014 гг.

В табл.1 представлена статистика срочных данных уровня моря МГС Таганрог. Расчеты проведены для 1995 – 2004 и 2005 – 2014 гг. Как видно по данным табл.1, ряды данных срочного уровня моря, полученные на МГС Таганрог в 1995 – 2004 и 2005 – 2014 гг., имеют практически идентичные показатели среднего значения вариационного ряда, стандартного отклонения, медианы, первого и третьего квартиля. В обоих случаях наблюдается левосторонняя асимметрия (коэффициент асимметрии для ряда за 1995 – 2004 гг. равен – 1,52, а для значений за 2005 – 2014 гг. составил – 1,39). Рассчитанные коэффициенты асимметрии считаются значительными, так как их величины менее – 0,5.

Анализируя значения эксцесса, можно заметить, что полученные кривые распределения островершинные, то есть более крутые по сравнению с кривыми нормального распределения. Данные за 1995 – 2004 гг. характеризуются

Т а б л и ц а 1. Статистика срочных данных уровня моря в районе МГС Таганрог (периоды анализа 1995 – 2004, 2005 – 2014 гг.).

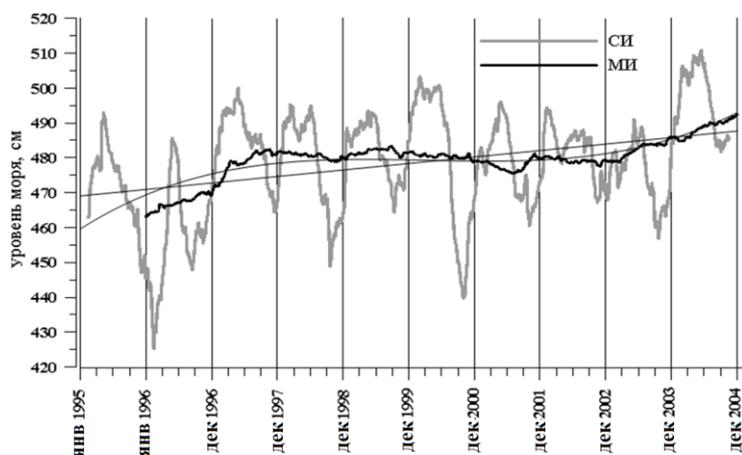
название показателя	значение за 1995 – 2004 гг.	значение за 2005 – 2014 гг.
среднее значение ряда, см	478,49 ± 0,67	479,14 ± 0,67
стандартное отклонение, см	41,04	41,13
асимметрия	– 1,52	– 1,39
эксцесс	7,32	6,63
минимальное значение, см	162	189
максимальное значение, см	804	751
медиана, см	485	485

более плотным распределением значений вокруг среднего (у этого ряда эксцесс в 1,1 раз больше, чем у вариационного ряда за 2005 – 2014 гг.).

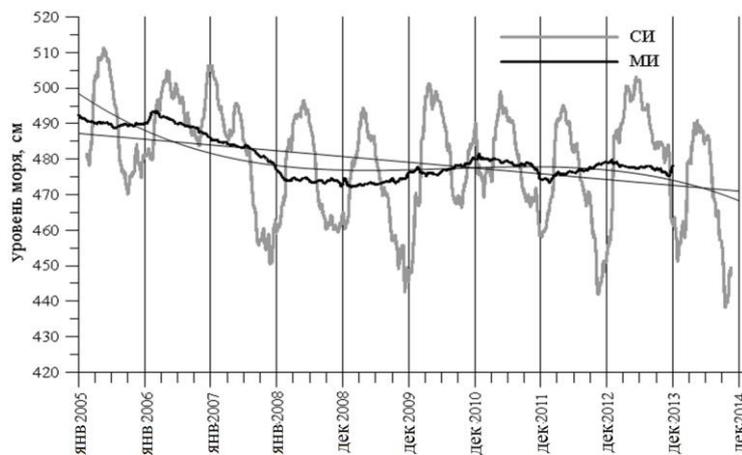
Проведенный анализ частот значений уровня демонстрирует, что 75 % данных каждого ряда не превышает 501 см.

Рассмотрим графики сезонной (СИ) и межгодовой изменчивости (МИ) уровня моря в Таганроге, линейного и кубического трендов за периоды 1995 – 2004 гг. и 2005 – 2014 гг. (рис.1, 2). Графики рассчитывались фильтрацией методом скользящего среднего с шириной окна 91 и 731 день соответственно.

На рис.1 видно, что за период 1995 – 2004 гг. тренд положительный, коэффициент линейного тренда 1,86 см/год. При этом на рис.2 период 2005 – 2014 гг. характеризуется отрицательным трендом, коэффициент линейного тренда равен – 1,62 см/год, амплитуда сезонной изменчивости при этом составляла 30 – 45 см, а межгодовой 5 – 10 см.



Р и с . 1 . Сезонная (СИ) и межгодовая изменчивость (МИ) уровня моря в Таганроге, линейный и кубический тренды за период 1995 – 2004 гг.



Р и с . 2 . Сезонная (СИ) и межгодовая изменчивость (МИ) уровня моря в Таганроге, линейный и кубический тренды за период 2005 – 2014 гг.

При использовании исследуемых рядов срочного уровня моря МГС Таганрог для прогнозирования и моделирования модели следует настраивать таким образом, чтобы наибольший приоритет отдавался более поздним наблюдениям. В противном случае возрастает вероятность завышения модельных и прогнозных оценок.

Проведенный регрессионный анализ продемонстрировал, что сопоставимые по срокам ряды 1995 – 2004 гг. и 2005 – 2014 гг. имеют слабую взаимосвязь. При сопоставлении срочных данных уровня значения 1995 – 2004 гг. позволяют спрогнозировать лишь 0,1 % значений 2005 – 2014 гг. Построенная регрессия для рассчитанных среднегодовых величин характеризуется коэффициентом детерминации 0,6, что показывает недостаточное соответствие регрессионной модели данным.

Сравним распределение по годам опасных штормовых сгонов/нагонов. Период 1995 – 2004 гг. характеризуется одинаковым количеством сгонных и нагонных ситуаций. Сильные сгоны имели место только в 1995 г. (13 – 14 марта), их спровоцировал восточно – северо-восточной, восточный ветер со средней скоростью 9,3 м/с и порывами до 20 м/с. Длительный штормовой нагон зафиксирован 12 апреля 1997 г., его вызвал южный, юго – юго-западный ветер со средней скоростью 23 м/с.

Период 2005 – 2014 гг. характеризуется относительным балансом между ситуациями сгонов и нагонов. Сильные сгоны возникли в 2009 и 2014 гг., а штормовые нагоны зафиксированы, в основном, к концу этого периода в 2013 и 2014 гг.

Так как имеется точная информация по двум экстремальным штормовым нагонам 2013 и 2014 гг., изучим распределение по месяцам особо опасных штормовых сгонов/нагонов в районе МГС Таганрог за период 1995–2014 гг. Сгоны преимущественно проявляются в осенне-зимний и весенний период – ноябрь, декабрь, январь и март, в то время как нагоны в весенне-летний период – март, апрель и август. По количеству сгонов больше всего приходится на январь и март, а по количеству нагонов – на апрель и сентябрь. Явно прослеживается преобладание случаев понижения уровня по отношению к случаям превышения, что вполне согласуется с сезонным ходом ветра над Таганрогским заливом [2].

**Характеристика опасных ситуаций.** Для выделения штормовых нагонных ситуаций вблизи МГС Таганрог за период 2005 – 2014 гг. использованы отметки уровня, превышающие заданные градации (например, минимальное значение из ряда годовых максимумов уровня). Для выделения опасных штормовых ситуаций вблизи МГС Таганрог использованы следующие критические отметки уровня: 670 см от нуля поста (170 см в БСВ) для НЯ и 705 см от нуля поста (205 см в БСВ) для ОЯ. Для сгонных явлений принимались отметки НЯ 300 см от нуля поста (– 200 см в БСВ) и 200 см от нуля поста (– 300 см в БСВ) для ОЯ.

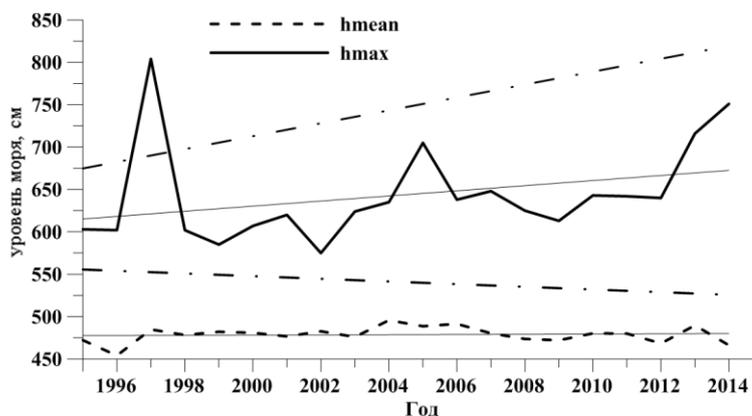
Анализ опасных штормовых нагонов вблизи береговой станции Таганрог за 10-тилетний период с 2005 г. показал, что значительное повышение уровня возникает при длительном воздействии западного, западно – юго-западного и юго-западного ветра. При западном направлении ветра зарегистрировано 2 опасных повышения уровня: в феврале 2005 г. и марте 2013 г.

Штормовые нагоны при западно – юго-западных и юго-западных ветрах наблюдались в сентябре 2014 г. при средней скорости ветра 16 и 14 м/с.

Из 6 зарегистрированных в 2005 – 2014 гг. опасных сгонов в 4 случаях (66,7 %) спады уровня моря сопровождались ветром северо-восточного направления со средней скоростью 5,5 м/с. По 1 разу сгоны были вызваны восточными, восточно – северо-восточными ветрами со средней скоростью 9 и 7 м/с соответственно. Самый значительный спад уровня моря в районе МГС Таганрог в 2005 – 2014 гг. наблюдался 30 – 31 января 2014 г. Спровоцировал опасную штормовую ситуацию ветер северо-восточного направления со средней скоростью 5,5 м/с и порывами до 17 м/с.

Для исследования экстремальных значений уровня моря применялся традиционный подход составления статистических выборок данных: составлялся ряд годовых экстремумов на основе ряда срочных наблюдений уровня моря [10]. Рассчитаны годовые средние ( $h_{mean}$ ) и годовые максимумы уровня моря ( $h_{max}$ ) для Таганрога за 1995 – 2014 гг., их линейный тренд и его 95 % доверительные интервалы (рис.3). Для годовых средних коэффициент линейного тренда составил 0,13 см/год, для годовых максимумов уровня моря 3,02 см/год (рис.3). Для расчета функции распределения экстремумов необходима стационарность анализируемого ряда, поэтому использовались отклонения  $h$  максимальных высот  $h_{max}$  от среднегодовых значений  $h_{mean}$ , т.е.  $h = h_{max} - h_{mean}$ , что позволило исключить влияние детерминированной составляющей на распределение экстремумов. Коэффициент линейного тренда для ряда отклонений  $h$  составил 2,9 см/год, затем для расчета функции распределения экстремумов ряд нормировался. Следует отметить, что по графикам среднегодовых значений в сравнении с данными *ESIMO* за пересекающийся по имеющимся данным период наблюдений значения уровня совпадают [6].

**Результаты и обсуждения.** В результате анализа срочных данных уровня моря МГС Таганрог за период 1995 – 2014 гг. удалось установить, что при использовании исследуемых рядов для прогнозирования и моделирования следует выделять две типичные ситуации. Это связано с тем, что



Р и с . 3 . Годовые средние ( $h_{mean}$ ) и максимумы уровня моря ( $h_{max}$ ) для Таганрога 1995 – 2014 гг., линейный тренд (сплошная тонкая линия) и 95 % доверительные интервалы (линия точка – штрих-пунктир).

полученные за 1995 – 2004 гг. и 2005 – 2014 гг. ряды имеют противоположные тенденции к изменчивости. Так, значения после 2005 г. характеризуются выраженным снижающимся трендом, в то время как значения ряда до 2004 г. имеют общую тенденцию к росту.

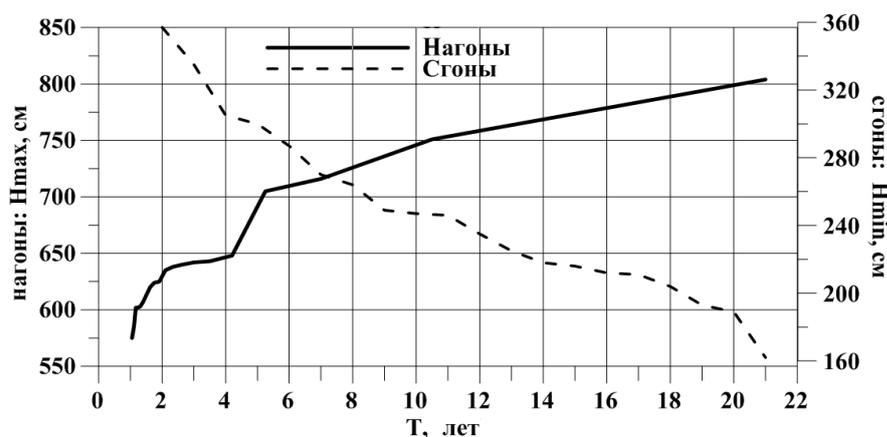
Проведенный анализ демонстрирует, что для оцениваемых рядов данных получены практически идентичные показатели среднего значения вариационного ряда, стандартного отклонения, медианы, первого и третьего квартиля. Эти величины можно использовать в качестве базовых при оценке динамики значений уровня моря, а также в прогнозных моделях.

За исследуемый период выделено 4 случая опасного подъема и 6 случаев опасного спада уровня моря. Значительное повышение уровня возникает при длительном воздействии западного, западно – юго-западного и юго-западного ветра. Опасные спады уровня моря сопровождалась ветром северо-восточного, восточного, восточно – северо-восточного направления.

Для всего периода наблюдений 1995 – 2014 гг. рассчитана функция распределения экстремальных уровней, которая определялась отдельно для нагонов и сгонов. Для получения этих функций использовался подход на основе метода В.Лангбейна [10], который позволяет рассчитать длительность периода повторяемости  $T$  (в годах) по выборке, составленной из годовых максимумов (минимумов) уровня моря (рис.4). Период повторяемости есть величина, обратная величине вероятности превышения заданной величины уровня моря за отдельно взятый год, график приведен на рис.4 для всего 20-тилетнего интервала. Для экстраполяции в области малой повторяемости уровней моря (для  $T > 20$  лет) использовалось двойное экспоненциальное распределение [3].

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

1. Период 2005 – 2014 гг. характеризуется большей частотой экстремальных штормовых нагонов по сравнению с периодом 1995 – 2004 гг., что отражает декадную перестройку типов атмосферной циркуляции над Азовским морем [4].



Р и с . 4 . Кривая обеспеченности максимальных и минимальных годовых высот уровня моря в Таганроге по данным максимальных (минимальных) высот за период 1995 – 2014 гг.

2. Получены оценки статистических характеристик уровня моря, амплитуд сезонной (30 – 45 см) и межгодовой (5 – 10 см) изменчивости, рассчитаны коэффициенты линейного тренда уровня (0,13 см/год для среднегодовых величин и 2,9 см/год для годовых максимумов относительно среднегодовых величин) и их доверительные интервалы.

3. Получены оценки повторяемости экстремальных значений уровня моря для масштаба времени, сравнимого с периодом наблюдений. Для экстраполяции кривой обеспеченности в области малой повторяемости уровня моря (для  $T > 20$  лет) рекомендуется использовать двойное экспоненциальное распределение.

4. Критические отметки уровня как опасного явления для МГС Таганрог составляют при нагонах – 705 см от нуля поста (205 см БСВ); при сгонах – 200 см от нуля поста (– 300 см БСВ). При анализе данных явно прослеживаются два экстремальных штормовых нагона 2013 г. и 2014 г. в Таганрогском заливе и устье Дона, период повторяемости таких нагонов составил около 10 лет. За исследуемый период выделено 4 случая опасного подъема и 6 случаев опасного спада уровня моря.

Результаты проведенного исследования представляют интерес для построения эмпирических моделей прогноза сгонно-нагонных явлений на МГС и валидации численного моделирования штормовых нагонов, что позволит повысить точность модельных и прогнозных оценок особо опасных явлений.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта «мол\_а» РФФИ №18-31-00274 «Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море и их проявлений в дельте реки Дон в зависимости от типов синоптических штормовых ситуаций».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белокопытов В.Н., Фомин В.В., Ингеров А.В. О комплексных исследованиях опасных природных явлений в Азово-Черноморском бассейне // Морской гидрофизический журнал.– 2017.– № 3.– С.32-48.
2. Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Тимошенко Т.Ю., Фомина И.Н., Левицкая О.В., Сивомов В.Г., Мартынов Е.С. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря.– Киев: Феникс, 2012.– 238 с.
3. Лемешко Е.Е., Полозок А.А. Экстремальные значения уровня Азовского моря по данным береговых измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– № 3.– С.13-21.
4. Лемешко Е.Е., Бердников С.В., Лемешко Е.М. Идентификация метеорологических условий для развития штормовых нагонов в прибрежной зоне Азовского моря и дельте Дона // Экология. Экономика. Информатика. Т.1.– 2016.– С.111-117.
5. Дьяков Н.Н., Фомин В.В. Синоптические условия возникновения аномальных колебаний уровня Азовского моря // Труды УкрНИГМИ.– 2002.– вып.250.– С.332-341.
6. ЕСИМО. Азовское море. Гидрометеорология прибрежной зоны. [Электронный ресурс].– URL: [http://www.esimo.ru/atlas/Azov/2\\_windvelocity\\_station\\_99024\\_2\\_13.html](http://www.esimo.ru/atlas/Azov/2_windvelocity_station_99024_2_13.html), [http://www.esimo.ru/atlas/Azov/2\\_waterlevel\\_station\\_99024\\_1.html](http://www.esimo.ru/atlas/Azov/2_waterlevel_station_99024_1.html) (дата обращения 15.01.2019 г.)

7. Пономаренко Е.П., Сорокина В.В., Бирюков П.А. Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007 – 2010 году // Вестник Южного научного центра РАН.– 2012.– т.8, № 1.– С.28-37.
8. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Швердяев И.В., Клеценков А.В., Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Вестник Южного научного центра РАН.– 2014.– т.10, № 1.– С.17-24.
9. Фомин В.В., Алексеев Д.В., Лемешко Е.М., Лазоренко Д.И. Расчет и анализ морских наводнений в дельте р.Дон // Метеорология и гидрология.– 2018.– № 2.– С.45-54.
10. Langbein W.B. Annual floods and the partial duration flood series // Trans. Amer. Geophys. Union.– 1949.– v.30, № 6.– P.879-881.

Материал поступил в редакцию 21.01.2019 г.  
После доработки 25.02.2019 г.

A.A.Polozok, E.E.Lemeshko, I.N.Fomina

#### CHARACTERISTICS OF THE EXTREME VALUES OF THE SEA LEVEL IN THE TAGANROGSKY BAY DURING 1995 – 2014

The statistical analysis of sea level data obtained at the MHS Taganrog during 2005 – 2014 is presented, including the basic statistical characteristics of the analyzed series and the linear trend coefficient are calculated. The comparative analysis of the obtained statistical indicators with the values of descriptive statistics during 1995 – 2004 is carried out. Conclusions on the tendency in the variability of data series are made. The characteristic of dangerous storms surges recorded near the MHS Taganrog in 2005 – 2014 is given. Evaluation of the linear trend of annual maximums of sea level was obtained, and the probability curve of maximum annual heights of sea level in Taganrog, exceeding the lowest annual maximum for the period 1995 – 2014, was calculated.

**KEYWORDS:** storm surges, storm situations, sea level, level measurements, MHS Taganrog