

УДК 551.46(99)

О СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА НА ПОБЕРЕЖЬЕ АНТАРКТИДЫ, А ТАКЖЕ О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ ТАЯНИЯ ЛЬДОВ В ЕГО ПОВЫШЕНИИ

Р.Р. Белевич¹, А.М. Буров¹, И.П. Неверовский², М.И. Скипа¹

¹Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины, г. Одесса, ул. Преображенская, 3, acoustics@farlep.net

²Гидрометеорологический центр Черного и Азовского морей ГМС Украины, г. Одесса, Французский бульвар, 89, odessa.pogoda@te.net.ua

Реферат. На підставі аналізу рядів середньомісячних висот рівня восьми прибережних станцій Антарктиди виділено час (місяць) настання екстремумів і величини їх амплітуд у сезонному ході даної характеристики. У міжрічній мінливості рівня виявлено періоди й амплітуди домінуючих довгоперіодних хвильових збурень.

Зроблено спробу, застосувавши метод водного нівелювання й вибравши Брест як реперну станцію, оцінити (за трендами міжрічних коливань рівня станцій) кількість води, що розтанула та потрапила у Світовий океан з Антарктиди. У результаті розраховано кількість талої води, що потрапила за даний період із Антарктиди у Світовий океан. Аналогічні орієнтовні оцінки було проведено також для о. Гренландія і Північного Льодовитого океану.

Отримані об'єми води, що потрапили до Світового океану від названих об'єктів, хоча вони й оціночні та дискусійні, представляються правдоподібними і близькими до істинних.

Реферат. На основании анализа рядов среднемесячных высот уровня восьми прибрежных станций Антарктиды выделены время (месяц) наступления экстремумов и величины их амплитуд в сезонном ходе рассматриваемой характеристики. В межгодовой изменчивости уровня выявлены периоды и амплитуды доминирующих долговременных волновых возмущений.

Предпринята попытка, применив метод водного нивелирования и выбрав в качестве реперной станции Брест, оценить (по трендам межгодовых колебаний уровня станций) количество растаявшей воды, которая поступила в Мировой океан из Антарктиды. В итоге рассчитано количество растаявшей воды, поступившей за рассматриваемый период из Антарктиды в Мировой океан. Аналогичные ориентировочные оценки были проведены также для о. Гренландия и Северного Ледовитого океана.

Полученные объемы воды, поступившие в Мировой океан от названных объектов, хоть и являются оценочными и дискуссионными, представляются правдоподобными и близкими к истинным.

The abstract. The analysis of the monthly average heights of a level on 8 coastal Antarctic stations has allowed to establish time (month) of approach of extremum and sizes of their amplitudes in a seasonal data. In interannual variability of a level are revealed the periods and amplitudes of the dominating long-periodic waves.

The estimation of the amount thawed ice which has got as water to the World ocean from Antarctica, has been carried out on trends of interannual fluctuations of a level on the stations. For this purpose the method of water leveling was used, and as main station the Brest station have been chosen. In a result the amount of water which has arrived from Antarctica to World Ocean for the researched period is designed.

Similar rough estimations have been carried out also for the Greenland and the Arctic Ocean.

The designed volumes of water which has arrived to World Ocean from the named objects are debatable estimation, however are represented close to true.

Key words: Seasonal and interannual variability, Antarctica, level, World Ocean, water leveling

1. Введение

Разномасштабные колебания уровня Мирового океана и отдельных его регионов играют важную роль в понимании глобальных процессов, происходящих на поверхности нашей планеты.

В последнее время в научной литературе и средствах массовой информации много внимания уделяется вопросам, волнующим все человечество, а именно – возрастающей тенденции повышения уровня Мирового океана, которое обусловлено потеплением климата Земли (Горячкин и др., 2006, Богуславский и др., 1997). Считается, что основной причиной этого повышения является таяние материковых ледников Антарктиды, Гренландии, льдов Арктики, ледовых шапок горных вершин.

По данным экспертов ООН, континентальные ледники Антарктиды, Гренландии, плавающие и припайные льды Северного Ледовитого океана в настоящее время тают быстрее, чем предполагалось ранее. По их мнению, если исчезнет значительное количество арктических льдов, то уровень Мирового океана угрожающе повысится, а это грозит миру экологической катастрофой.

В Антарктиде сосредоточено 90% мировых запасов льда. Свыше 99% ее территории покрыто льдом, средняя толщина которого превышает 1700 метров.

За последние 50 лет температура воздуха на этом континенте возросла на 3 °С. В Арктике за последние 30 лет вообще потеплело на 5-6 °С. Отмечается, что если в начале-середине XX в. толщина плавающих льдов, занимающих 9/10 площади Северного Ледовитого океана, составляла 4,5–4,0 м, то к началу XXI в. она уменьшилась на 40 %, т.е. за 75 лет потеряла в высоте 1,7 метра.

Довольно заметным поставщиком воды в Мировой океан является и о. Гренландия, свыше 80% территории которого занято покровным ледником со средней толщиной около 1500 м. Обращено внимание, что ежегодно у берегов Гренландии образуется 13–15 тыс. айсбергов.

К настоящему времени убедительно показано, что уровень Мирового океана в течение XX столетия повысился на 10–20 см (Горячкин и др., 2006, Богуславский и др., 1997). По нашим оценкам, основанным на обобщении данных восьми исследователей, занимавшихся этим вопросом (Горячкин и др., 2006), уровень Мирового океана в XX ст. за 100 лет повысился на 16,6 см. По прогнозу экспертов, тенденция возрастания уровня увеличивается, и через 50 лет он может повыситься на 28–43 см. Вместе с тем в некоторых литературных источниках отмечается, что никаких значительных тенденций в изменении площади морского льда в регионе Антарктиды не обнаружено (Горячкин и др., 2006).

В то же время хорошо известно о наличии в водах Антарктики вблизи Антарктиды большого количества дрейфующих айсбергов, отрывающихся от его припайного шельфа и, естественно, пополняющих воды Мирового океана. Вполне возможно, что здесь процесс таяния льдов происходит не за счет уменьшения площади припайного шельфа, а за счет уменьшения толщины самого ледового покрова материка.

2. Характеристика использованного материала, методика обработки

Представилось интересным в этой связи, имея в распоряжении сведения о среднемесячных колебаниях уровня на восьми прибрежных станциях Антарктиды (Permanent Service for Mean Sea Level, <http://www.pol.ac.uk/psmsl>), охватывающих примерно половину ее широтного кольца (между 64° з.д. и 111° в.д., табл. 1), рассмотреть некоторые особенности сезонных и, главное, межгодовых колебаний этой характеристики, оценить тенденцию роста уровня и попытаться косвенно оценить количество растаявшего здесь льда, пополнившего воды Мирового океана.

В таблице 1 приведены названия анализируемых станций побережья Антарктиды, их государственная принадлежность, координаты и продолжительность наблюдений. Кроме того, в ней приведены еще некоторые дополнительные сведения и данные, о сути которых будет сказано ниже.

Таблица 1. Исследуемые станции побережья Антарктиды, их координаты, период и продолжительность уровенных наблюдений, коэффициенты тренда уровня станций за весь период и 11 лет и их разность со станцией Брест

Станция, государственная принадлежность	Координаты		Период наблюдений, гг.	Продолжительность наблюдений, гг.	Количество пропусков наблюдений (мес.) от общего числа, %	Коэффициенты тренда уровня на станциях, мм/год						
						За весь период наблюдений			За 11 лет			
	φ	λ				Исследуемая станция	Станция Брест	Разность исследуемой станции и Брест	Анализируемый период, гг.	Исследуемая станция	Станция Брест	Разность исследуемой станции и Брест
Аргентинские острова, Англия, Украина	65°15' ю.ш.	64°16' з.д.	1958-2004	47	2,5	0,02	1,68	-1,66	1993-2003	-1,11	4,41	-5,52
Алмиранте Браун, Аргентина	64°54' ю.ш.	62°52' з.д.	1966-1980	15	9	0,89	-3,86	4,75	1970-1980	-6,22	1,56	-7,78
Пуэрто Соберания, Чили	62°29' ю.ш.	58°47' з.д.	1984-1997	14	2	2,03	-3,40	-1,37	1987-1997	1,55	3,48	-1,93
Баха Эсперанса, Аргентина	63°18' ю.ш.	56°55' з.д.	1962-1978	17	29	-7,92	-1,41	-6,51	1968-1978	-9,46	-3,93	-5,53
Сиова, Япония	69°00' ю.ш.	39°34' в.д.	1978-2001	24	0,3	-32,31	3,47	-35,78	1991-2001	-14,3	7,56	-21,86
Моусон, Австралия	67°37' ю.ш.	62°53' в.д.	1993-2003	11	2	3,09	4,41	-1,32	1993-2003	3,09	4,41	-1,32
Дейвис, Австралия	68°27' ю.ш.	77°58' в.д.	1993-2003	11	2	2,34	4,41	-2,07	1993-2003	2,34	4,41	-2,07
Кейси, Австралия	66°16' ю.ш.	110°31' в.д.	1996-2002	7	12	0,76	6,83	-6,07	1996-2002	0,76	6,83	-6,07

Говоря о качестве данных рядов среднемесячных высот уровня на рассматриваемых станциях побережья Антарктиды, нужно, к сожалению, в общем признать его недостаточно высоким. Длительность временных рядов наблюдений на станциях была довольно непродолжительной (табл. 1). Наблюдается большое количество пропусков наблюдений в их среднемесячных рядах. Примерно на трети станций имеются пропуски в среднемесячных данных, которые в процентном выражении от общего количества месяцев наблюдений колеблются в пределах от 9 до 29% (табл. 1). На некоторых станциях наблюдались смещения нулей футштоков (ст. Сиова, ст. Аргентинские острова). Сомнение вызывает подобное и на ст. Алмиранте Браун. На ст. Эсперансе наблюдалось максимальное количество пропусков в рядах среднемесячных данных, которое в процентном выражении

составило 29% от общего периода наблюдений, поэтому приводимые по этой станции результаты расчетов следует рассматривать как ориентировочные. В такой ситуации, прежде чем приступить к анализу материалов станций, пришлось предварительно провести их технический и критический контроль. Единичные пропуски в рядах среднемесячных высот уровня были по возможности восстановлены имеющимися в океанологии методами (Победоносцев, 1978). Скорректированы смещенные нули футштоков. Наиболее продолжительные и качественные (после корректировки) ряды среднемесячных высот уровня, по нашему мнению, имели место на ст. Аргентинские острова и ст. Сиова. Наиболее коротким был ряд наблюдений на ст. Кэйси. Заметим, что ст. Аргентинские острова с начала периода наблюдений (1958 г.) и до конца 1995 г. была известна еще как английская ст. Фарадей. С 1996 г. она была передана Украине и известна сейчас под вторым названием как ст. Академик Вернадский.

С целью выявления роли таяния льдов Антарктиды в повышении уровня Мирового океана в работе был применен известный в океанологии метод водного нивелирования (Зенин, 1961), позволяющий исключать «ошибки», возникающие в уровенных наблюдениях при наличии в них дополнительных возмущений, обусловленных колебаниями суши. Метод позволяет также выявлять и оценивать вертикальные смещения самой прибрежной суши (эти «ошибки»). Именно по такому пути мы попытались пойти в дальнейшем при анализе межгодовых колебаний уровня на побережье Антарктиды. В данном случае мы исходили из предположения, что потеря Антарктидой определенного количества (объема) льда обусловила соответствующий подъем суши самого материка.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Сезонные колебания

Рассматривая сезонный ход уровня на восьми станциях побережья Антарктиды (табл. 2), отметим, что четыре первые из них располагались «кустом» в Западном полушарии на небольшом расстоянии друг от друга (330x340 км) к западу от Антарктического полуострова в Тихоокеанском секторе Антарктиды. Самая восточная станция этого «куста» – Эсперансе располагалась на северной оконечности Антарктического полуострова. Остальные четыре станции Антарктиды (табл. 1), вне указанного «куста», располагались относительно равномерно в Восточном полушарии вдоль побережья ее атлантического и индоокеанского секторов.

Сведения о сезонных экстремумах в годовом ходе уровня и амплитудах его колебаний на анализируемых станциях Антарктиды приведены в таблице 2. Заметим, что в ней, наряду с расчетами времени наступления экстремумов при климатическом осреднении данных по месяцам за весь период наблюдений и за последние 11 лет (для возможного сопоставления), приведены также результаты расчета времени (даты и месяцы), а также амплитуд, путем осреднения ежегодных экстремумов за весь период наблюдений (табл. 2).

Анализ результатов (табл. 2) показал, что в среднем в году максимум во внутригодовом ходе уровня на всем рассматриваемом побережье Антарктиды наступал в апреле (с вариациями от марта до мая). Это следует как из анализа данных климатического осреднения за весь период наблюдений и 11 лет, так и из осреднения результатов по экстремумам.

Месяцы минимальных высот в сезонном ходе уровня несколько варьировали и наблюдались на станциях Тихоокеанского сектора преимущественно в сентябре-октябре, тогда как на станциях индоокеанского сектора при климатическом и экстремальном осреднении – в ноябре. Исключением здесь явилась лишь ст. Сиова, сезонный минимум на которой отмечен лишь в январе как для данных, полученных при климатическом осреднении, так и при осреднении по экстремумам. Помимо упомянутых основных

сезонных экстремумов во внутригодовом ходе уровня, на некоторых станциях в отдельные годы наблюдались довольно значительные дополнительные всплески и провалы его, приуроченные к другим месяцам года. Природа и причина их появления не совсем ясна и требует проведения дополнительных исследований.

Таблица 2. Месяцы экстремумов и амплитуды в сезонном ходе уровня на станциях Антарктиды

Станции	Климатическое осреднение								Осреднение по ежегодным экстремумам		
	Среднее за период наблюдений				Среднее за 11 лет				Среднее за период наблюдений		
	Период наблюдений гг.	Месяц		Амплитуда, мм	11-летний период осреднения	Месяц		Амплитуда, мм	Дата, месяц		Амплитуда, мм
max		min	max			min	max		min		
Аргентинские о-ва	1958-2004	IV	IX	77	1993-2003	IV	IX	74	18. IV	24. IX	154
Пуэрто Соберания	1984-2002	IV	IX	75	1992-2002	IV	IX	67	24. III	25. IX	129
Алмиранте Браун	1966-1980	V	X	88	1970-1980	V	X	88	24. IV	11. X	127
Эсперансе	1962-1978	III	X	56	1968-1978	III	X	79	12. V	10. X	158
Сиова	1978-2001	V	I	138	1991-2001	IV	XI	158	1. V	18. I	259
Моусон	1993-2003	III	XI	106	1993-2003	III	XI	106	6. IV	8. XI	146
Дейвис	1993-2003	III	XI	71	1993-2003	III	XI	71	30. III	9. XI	112
Кейси	1996-2002	IV	XI	135	1996-2002	IV	XI	135	15. IV	15. XI	143

Амплитуды сезонных колебаний уровня, вычисленные при климатическом осреднении, на большинстве станций колебались в пределах 6–11 см. Лишь на ст. Сиова и Кейси средние их величины достигали 14–16 см (табл. 2). Интересно отметить, что амплитуды сезонных колебаний уровня, вычисленные при осреднении по ежегодным экстремумам, оказались в 1,5–2,0 раза больше климатических и были равны на большинстве станций 11–16 см, а для ст. Сиова – около 26 см (табл. 2). Причиной таких различий в вычисленных сезонных амплитудах уровня являются, по нашему мнению, межгодовые вариации месяцев наступления экстремумов на станциях Антарктиды.

Подводя итоги анализа сезонных колебаний уровня, следует обратить внимание на различную продолжительность периодов падения и роста его в отдельных регионах (табл. 2). Так, если на станциях тихоокеанского сектора период падения уровня (от max до min) составлял 5,5 мес., а период роста (от min до max) – 6,5 мес., то на станциях индоокеанского сектора он составлял соответственно 7–7,5 мес. и 4,5–5 мес. На ст. Сиова в атлантическом секторе период сезонного падения уровня вообще составлял 8–8,5 мес., тогда как роста – всего 3,5–4 мес.

3.2. Межгодовая изменчивость

Рассматривая межгодовую изменчивость уровня на побережье Антарктиды, можно констатировать, что формирование его колебаний, как и во всем Мировом океане, обусловлено наличием знакопеременного тренда, на фоне которого развиваются разномасштабные долгопериодные возмущения волнового характера.

Спектральный анализ рядов среднемесячных высот уровня двух станций с наиболее продолжительными наблюдениями (ст. Аргентинские о-ва – 47 лет, ст. Сиова – 25 лет), а также качественные оценки характера межгодовой изменчивости на остальных станциях Антарктиды показали, что в их межгодовых возмущениях доминировали колебания с периодами 2, 4–5, 10–14 (в ср. 12 лет) и 22–24 года.

В работе (Школьный и др.) при анализе временных рядов барика в этом же регионе также выявлено присутствие аналогичных (11-, 4- и 2-летних) периодичностей. Визуальные

оценки свидетельствуют о возможном существовании в рассматриваемом регионе волновых возмущений уровня и на периоде 18–19 лет. Заметим, что периоды 18–19 лет и 22–24 года, при вышеупомянутой продолжительности рассматриваемых рядов, представляются недостаточно достоверными.

Амплитуды волн выявленных периодов в среднем находились в пределах 4–7 см; лишь 24-летняя волна имела величину 10–12 см.

4. О роли таяния материковых льдов в повышении уровня Мирового океана

4.1. Антарктида

Одним из надежных показателей тенденции, а также характера и динамики долгопериодной изменчивости уровня на станции может служить знак и величина его коэффициента тренда. Положительный тренд свидетельствует о росте уровня на станции, отрицательный – о его падении. Такие утверждения справедливы, однако, лишь при условии стабильности и отсутствии вертикальных смещений прибрежной суши, с которой ведутся уровенные наблюдения. В противном случае в измеряемые высоты уровня закладывается «ошибка», обусловленная подъемом или опусканием самой суши. При неизменном уровне наблюдаемый подъем его свидетельствует об опускании суши, а понижение – о ее поднятии.

Для суждения о тенденции межгодовых изменений уровня на побережье Антарктиды были рассмотрены тренды анализируемых станций, вычисленные за весь период наблюдений на них и за последние 11 лет. Анализ их абсолютных величин показал (табл. 1), что в рассматриваемый период (1958–2004 гг.) на большинстве станций Антарктиды преобладали небольшие положительные его значения (от 0 до 3,09 мм/год). Исключением явились ст. Сиова, на которой наблюдался довольно значительный отрицательный тренд (-32,31 мм/год) и ст. Эсперансе с отрицательным трендом -7,92 мм/год.

В 11-летнем ряду трендов (табл. 1) на рассматриваемых станциях наблюдались примерно одинаковой повторяемости их положительные и отрицательные величины (мм/год) со слабыми (1,53 ч -1,11), умеренными (3,09 ч 2,34) и большими отрицательными (-6,22 ч -14,3) их значениями. Существование столь больших отрицательных значений коэффициентов тренда на ряде станций дало повод предположить наличие в исследуемом регионе Антарктиды хорошо выраженного поднятия прибрежной суши.

Метод водного нивелирования, как известно, применим для оценки характера колебаний суши только при условии использования, наряду с анализируемой, еще и «реперной» станции. На «реперной» станции должны иметь место колебания уровня Мирового океана, обусловленные воздействием только эвстатических факторов, т.е. повышения или понижения его уровня за счет таяния льдов Антарктиды, Гренландии, припайных и островных льдов Арктики, ледовых шапок горных вершин или интенсивного испарения. Колебания же его за счет вертикальных смещений земной коры на ней должны отсутствовать (Зенин, 1961).

В качестве реперной станции была выбрана ст. Брест (Франция), удовлетворяющая, по нашему мнению, упомянутым требованиям. Вертикальные смещения суши на ней приняты отсутствующими. В таблице 1, помимо ранее упомянутых сведений, приведены также тренды уровня ст. Брест за периоды, соответствующие периодам наблюдений на анализируемых станциях, а также разности трендов исследуемой станции и ст. Брест. Именно эта разность и является показателем роста или опускания прибрежной суши на станциях Антарктиды.

Обобщая результаты вычисления разности трендов на станциях за весь период наблюдений и за последние 11 лет, можно констатировать, что в Антарктиде действительно существует хорошо выраженное поднятие суши.

Из всех приведенных в таблице 1 случаев (13) вычисления разности трендов только в одном из них (ст. Алмиранте Браун – данные за весь период наблюдений) происходило опускание суши; на остальных (12) – наблюдался подъем ее. При этом было обращено внимание на наличие на разных участках побережья материка трех различных по величине типов интенсивности поднятия суши (табл. 1, мм/год): слабого (-1,3 ч -2,1), умеренного (-5,5 ч -7,8) и сильного – на ст. Сиова -36,0 по данным за весь период наблюдений и -21,9 – за последние 11 лет.

Данные разности трендов на ст. Алмиранте Браун, давшие опускание суши 4,75 мм/год (табл. 1), не были приняты во внимание по упомянутой выше причине.

Зная площадь Антарктиды и располагая величинами поднятия прибрежной суши (табл. 1), которые обусловлены, по нашему предположению, потерей соответствующего количества льда, можно оценить объем воды, поступившей в Мировой океан с этого материка за год, а при необходимости – и за исследуемые периоды лет.

Строго говоря, распространение прибрежного поднятия суши на весь материк Антарктиды неравномерно, однако, как определенный сценарий, нам представляется в первом приближении такое предположение допустимым (осреднение по полукольцу побережья Антарктиды).

В таблице 3 приведено несколько сценариев расчета – по интенсивности поднятия суши (мм/год), возможного количества воды, поступающей ежегодно из Антарктиды в Мировой океан (км³/год). Оценки были выполнены отдельно для данных слабого, умеренного и сильного поднятий ее прибрежной суши, а также для средних величин, полученных после обобщения данных анализировавшихся станций на рассматриваемой территории, примерно равной половине кольца побережья Антарктиды. Оценки приведены при обобщении разности трендов (поднятие суши) за весь период (47 лет) наблюдений (110 км³/год) и за последние 11 лет (88,8 км³/год). Оценивая объем воды, поступившей из Антарктиды в Мировой океан в течение XX столетия, как это обычно делают для сравнения, получим соответственно 11х10³ км³/100 л. и около 9х10³ км³/100 л. Распространять полученную интенсивность поднятия суши Антарктиды на 100-летний период, по нашему мнению, не совсем корректно, поскольку, по мнению ряда исследователей, она в последние 2-3 десятилетия заметно возросла.

Таблица 3. Оценки средних интенсивностей подъема суши (разности трендов, мм/год) и ежегодного количества (объема) воды (км³/год), получаемого Мировым океаном из Антарктиды, Гренландии и Арктики за счет таяния их льдов

а) Антарктида (площадь 14х10⁶ км²)

Характер поднятия суши	Слабое	Умеренное	Сильное	В среднем
Разность трендов за весь период наблюдений, мм/год	-1,611	-6,347	-35,952	7,87
Объем воды, км ³ /год	22,6	88,9	503,3	110,2
Разность трендов за последние 11 лет, мм/год	-1,776	-6,321	-20,1	6,34
Объем воды, км ³ /год	24,9	88,5	281,4	88,8

б) Гренландия (площадь 2,2х10⁶ км²)

Название станции, координаты и период наблюдений, гг.	Алерт (35 лет), 82°30'с.ш. 62°19'з.д., 1970–2004	Амассалик (9 лет), 65°30'с.ш. 37°00'з.д., 1990–1998	Илуисат (6 лет), 69°13'с.ш. 51°06' з.д., 1992–1997	Среднее
Разность трендов (подъем суши) за период наблюдений, мм/год	-4,714	-6,65	-10,729	7,36
Объем воды, км ³ /год	8,30	11,70	18,88	≈13,0

в) Северный Ледовитый океан (площадь $13,1 \times 10^6 \text{ км}^2$)

Название станции, координаты и период наблюдений, гг.	Баренцбург, 78°04'с.ш. 14°15'в.д., 1973–2002	Нарвик, 68°26'с.ш. 17°25'в.д., 1973–2004	Рорвик, 64°52'с.ш. 11°15'в.д., 1981–2001	Среднее
Разность трендов, за период наблюдений, мм/год	-9,46	-4,63	-5,89	6,66
Объем воды, км ³ /год	123,9	66,6	77,2	89,2

4.2. Остров Гренландия

Наряду с вышеупомянутыми результатами расчетов, приведенными для материка Антарктиды, также была предпринята попытка провести ориентировочные оценки количества воды, поступившей в Мировой океан при таянии льдов о-ва Гренландия, с использованием той же методики водного нивелирования (табл. 3). К сожалению, данные об уровнях наблюдений на этом острове оказались еще более скромными. Удалось найти лишь отрывочные сведения о среднегодовых высотах уровня на ст. Алерт, расположенной на соседнем с Гренландией о-ве Элсмир, за 1970–2004 гг., и ряды среднемесячных данных об уровне на гренландских станциях Аммассалик за 1990–98 гг. и Ллулиссат за 1992–97 гг. Сведения о координатах станций, разности трендов на них (с реперной ст. Брест) и количестве потерянной при этом воды приведены в табл. 3. Отметим, что анализ разности трендов четко свидетельствует о хорошо выраженном здесь за рассматриваемые периоды лет поднятии суши в диапазоне от -4,7 до -10,7 мм/год. Зная площадь Гренландии и имея информацию о том, что лишь 80% ее территории покрыто льдом, можно оценить количество (объем) воды, поступивший с нее в Мировой океан (табл. 3).

Таким образом, можно констатировать, что с о. Гренландия терялось в год от 8,3 до 18,9 км³ воды, а в среднем примерно 13 км³. Следовательно, за 100 лет с него в Мировой океан поступило $1,3 \times 10^3 \text{ км}^3$ воды.

4.3. Северный Ледовитый океан

Интересным представилось также провести подобные оценки и для Северного Ледовитого океана. Были рассмотрены данные уровня наблюдений трех прибрежных норвежских станций: Баренцбург (о. Шпицберген), Нарвик и Рорвик (север Скандинавского п-ова) за последние 20–30 лет. Сведения о них приведены в табл. 3, где наряду со справочными данными о станциях указаны разности их трендов со ст. Брест, а также вычисленные объемы воды, образующиеся в результате поднятия прибрежной суши. Анализ разности трендов свидетельствуют о хорошо выраженном поднятии суши и в Северном Ледовитом океане. Разность трендов изменялась от -4,6 до -9,5 мм/год; средняя величина ее равнялась -6,67 мм/год. Зная площадь бассейна и среднюю величину поднятия прибрежной суши, легко вычислить количество (объем) воды, вытесняемой поднимающейся сушей, – 87,2 км³/год. За 100 лет этот объем составит $8,7 \times 10^3 \text{ км}^3$.

5. О надежности проведенных расчетов

Приведенные выше результаты оценочных расчетов количества растаявшего льда в Антарктиде, а также на о. Гренландия и в Арктическом бассейне методом водного нивелирования нуждаются в проверке на предмет их надежности и достоверности. Наше видение решения этого вопроса состояло в необходимости сравнения полученных результатов расчета с данными непосредственных оценок количества поступившей в Мировой океан воды. С этой целью было рассмотрено два сценария. Во-первых, это можно получить, если известно, что за 100 лет

уровень Мирового океана повысился на 16,6 см., а при его площади, равной $361 \times 10^6 \text{ км}^2$, объем поступившей воды составит $59,9 \times 10^3 \text{ км}^3$. В предположении, что таяние льдов на поверхности Земли происходит равномерно и всюду одинаково, количество растаявшей воды с каждого из рассматриваемых объектов должно быть пропорционально площади находящегося на ней льда. Результаты расчета при таком сценарии приведены в табл. 4 (колонка 3).

Возможно получение непосредственных независимых оценок количества воды, поступившей в Мировой океан и распределенной между объектами, и по второму сценарию, когда известно непосредственное количество воды, отданное Мировому океану одним из объектов благодаря таянию его льдов. При этом должны полностью сохраняться предположения и допущения первого сценария.

Выше была дана информация о том, что в начале – первой половине XX в. толщина льдов в Северном Ледовитом океане составляла 4,5–4,0 м, а к началу XXI в. она уменьшилась на 40%, т.е. за 75 лет высота льда понизилась на 1,7 м. Зная площадь арктического бассейна, покрытого льдом, и упомянутую толщину растаявшего льда, можно вычислить его объем за 75 ($20,1 \times 10^3 \text{ км}^3$) и 100 лет ($26,75 \times 10^3 \text{ км}^3$). При условии равномерного таяния льдов на поверхности Земли можно по объему (количеству) воды, растаявшей в Арктике, рассчитать пропорционально площади, занятой льдом в Антарктиде и Гренландии, объемы воды, поступившие в Мировой океан из этих объектов. Их сумма даст общий объем воды, полученный Мировым океаном (табл. 4, колонка 4) за 100 лет при независимых расчетах по второму сценарию.

Таблица 4. Объемы воды, полученные Мировым океаном за 100 лет в результате таяния льдов от своих объектов, по расчетным и фактическим данным и вычисленным по методу водного нивелирования ($\times 10^3 \text{ км}^3/100\text{лет}$).

Рассматриваемые объекты	Площадь Мирового океана и покрытых льдом объектов, $\times 10^6 \text{ км}^2$	Два сценария расчета объема воды, поступившей в Мировой океан от своих объектов за 100 лет, $\times 10^3 \text{ км}^3/100\text{лет}$		Объем воды, поступивший в Мировой океан за 100 лет, по методу водного нивелирования, $\times 10^3 \text{ км}^3/100\text{лет}$	Отношение фактического объема воды, поступившей в Мировой океан по двум сценариям, к объему воды, полученному по методу водного нивелирования	Объем воды, поступившей в Мировой океан, по методу водного нивелирования с учетом плотности суши, $\times 10^3 \text{ км}^3/100\text{лет}$ и в %	
		3	4			7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
Мировой океан	361	59,9	62,0	20,2	3,0 - 3,1	69,6-61,7	100
Антарктида	13,84	30,3	31,3	10	3,0 - 3,1	30,0-31,0	50,3
Северный Ледовитый океан	11,8	25,8	26,7	8,9	2,9 - 3,0	25,8-26,7	43,0
о. Гренландия	1,76	3,85	4,0	1,3	2,96 - 3,08	3,8- 4,0	6,4

В колонке 5 (табл. 4) приведены объемы воды, отданные исследуемыми объектами за 100 лет Мировому океану, при расчетах их по примененному в работе методу водного нивелирования. И, наконец, в колонке 6 (табл. 4) приведена (в отношениях) сравнительная оценка количеств (объемов) воды, отданных за 100 лет Мировому океану Антарктидой, Гренландией и Арктическим бассейном по фактическим данным, и вычисленных результатов, полученных путем применения метода водного нивелирования. Интересным и несколько неожиданным явился тот факт, что во всех случаях расчетов объемы воды, вычисленные по предложенному методу, оказались в 3,0–3,1 раза ниже результатов, найденных по фактическим данным. По нашему мнению, причина кроется в необходимости учета плотности поднимающейся суши при проведении подобного рода расчетов.

Согласно нашим оценкам, с учетом этого замечания за 100 лет в Мировой океан поступило от рассмотренных объектов около 61×10^3 км³ воды (табл. 4, колонка 7). При этом на долю Антарктиды приходилось свыше 50%, на долю Северного Ледовитого океана примерно 43% и на долю о. Гренландия – около 6,5% от общего объема воды, поступившего за этот период (табл. 4, колонка 8).

6. Заключение

Подводя итоги исследованию, проведенному в настоящей работе, отметим, что при анализе сезонных колебаний уровня на прибрежных станциях Антарктиды было установлено существование в его внутригодовом ходе годовой волны с максимумом в апреле. Время наступления месяцев минимума варьировало в зависимости от региона и наблюдалось в тихоокеанском секторе в сентябре–октябре, в индоокеанском секторе – в ноябре, а на ст. Сиова (атлантический сектор) даже в январе.

Показано также присутствие во внутригодовом ходе уровня на ряде станций заметного вторичного экстремума с максимумом в июле–августе и минимумом в мае–июне. Амплитуды сезонного хода уровня колебались в пределах 6–11 см при климатическом осреднении и были в 1,5–2 раза выше при осреднении их по ежегодным экстремумам.

Межгодовая изменчивость уровня на станциях Антарктиды характеризовалась наличием знакопеременного тренда и присутствием в его колебаниях целого спектра межгодовых волновых возмущений на периодах 2, 4–5, 10–14 и 22–24 года. Амплитуды этих возмущений изменялись в пределах 4–7 см., а наиболее мощные из них – до 10–12 см – выделялись лишь в 24-летней волне.

Детальный анализ трендов станций и их разностей со ст. Брест, проведенный для оценки объема воды, отдаваемой Антарктидой в Мировой океан, по величине поднятия суши с использованием метода водного нивелирования в итоге показал возможность такого подхода.

Оценочные расчеты объема воды, поступающего в Мировой океан из Гренландии и Северного Ледовитого океана, с использованием предлагаемой методики, по нашему мнению, также можно считать заслуживающими внимания.

Среди сомнений и нерешенных вопросов, возникших при проведении настоящего исследования, следует назвать, во-первых, насколько удачно и правомочно было использовать в качестве реперной такую удаленную от Антарктиды станцию, как Брест; во-вторых, насколько правомерным было распространение на весь материк поднятия суши по данным наблюдений на прибрежных станциях, охватывающих лишь половину его побережья; в-третьих, укажем на первоначально неправильно заложенное нами допущение о том, что объем поднявшейся суши Антарктиды (и др. объектов) равен объему воды, сброшенной из нее в Мировой океан. В данном случае должны действовать весовые отношения, поскольку плотность суши примерно в 3 раза больше плотности воды.

В заключение отметим, что использование метода водного нивелирования для расчетов количества воды, отдаваемой Антарктидой (и другими объектами) в Мировой океан, по нашему мнению, вполне допустимо. Вместе с тем полученные результаты необходимо признать оценочными и дискуссионными.

Список литературы

1. **Богуславский С.Г., Кубряков А.И., Иващенко И.К.** Изменения уровня Черного моря // Морской гидрофизический журнал, 1997, №3, с.47–57.
2. **Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.** Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее / Под редакцией академика НАН Украины В.Н.Еремеева. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 210 с.

Р.Р. Белевич: О СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА ...

3. **Зенин В.Д.** Метод водного нивелирования // Тр. ГОИН, 1961, вып. 61, с. 66–115.

4. **Победоносцев С.В.** Использование водного нивелирования для проверки и восстановления значений уровня моря. // Труды ГОИН, 1978, вып. 137, с. 97–107.

5. **Школьный Е.П., Галич Е.А.** Особенности крупномасштабных процессов в атмосфере западного сектора Южного полушария // Тезисы доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 75-річчю Одеського державного екологічного університету. – Одеса: ОДЕКУ. – 2007. – С. 185.

6. **Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)**, <http://www.pol.ac.uk/psmsl>.