

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ ЕВРОПЕЙСКОЙ АРКТИКИ

н.с. Р.И.МАЙ

Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института (СПО ГОИН), г. Санкт-Петербург, ritay@mail.ru

В статье на основе инструментальных наблюдений и результатов моделирования описываются линейные и нелинейные приливные явления в морях Европейской Арктики. Оцениваются остаточный приливной уровень, амплитуды и фазы нелинейных долгопериодных гармоник и вклад нелинейно-волновой модуляции в формирование изменчивости гармонических постоянных основных волн прилива.

Ключевые слова: приливы, нелинейные явления, Норвежское море, Баренцево море, Белое море

Характеристики основных волн прилива морей Европейской Арктики изучались ранее как с помощью численного моделирования [1, 4, 10, 12, 13, 17], так и обработкой натурных данных [2, 9]. Серия работ Прошутинского [10, 13] по определению приливных явлений в Северном Ледовитом океане основана на реализации численной гидродинамической модели с пространственным шагом 20 км. Пионерская для своего времени, работа содержит ряд неточностей и не раскрывает механизм генерации нелинейных явлений. Грубая сетка модели [10] неточно воспроизводит характеристики основных и нелинейных гармоник. Следует особо выделить работу [16]: авторы создали баротропную приливную модель Арктики с пространственным шагом 5 км, которая ассимилирует альтиметрическую спутниковую информацию и данные береговых измерений уровня. В работе [16] рассчитываются приливной уровень и приливные течения восьми основных волн прилива. Слабым местом этой работы представляется ассимиляция непроверенных гармонических постоянных: нет оценки качества вычисления гармонических постоянных устаревшими методами, и не учитывается влияние сезонной изменчивости констант прилива. Тем не менее последняя работа, как нам представляется, наиболее удачно описывает основные приливные волны в морях Европейской Арктики. Оценивание остаточных приливных течений по инструментальным данным затруднено из-за невозможности выделить остаточные составляющие из фоновых явлений (ветровые, термогалинные течения). Поэтому численное моделирование приливных явлений может быть наиболее успешным методом определения остаточных приливных явлений. Проводимые ранее эксперименты на численных моделях раскрыли некоторые особенности остаточных приливных явлений морей Европейской Арктики [1, 10, 17] и в частности Белого моря [6]. Однако во многих работах на открытой границе задавалась только одна полусуточная волна и не рассматривалось влияние астрономических условий, неравенств приливов, амплитудной модуляции и мелководных гармоник.

В целом следует отметить, что приливные явления, а особенно нелинейные приливные явления, до сих пор изучены недостаточно.

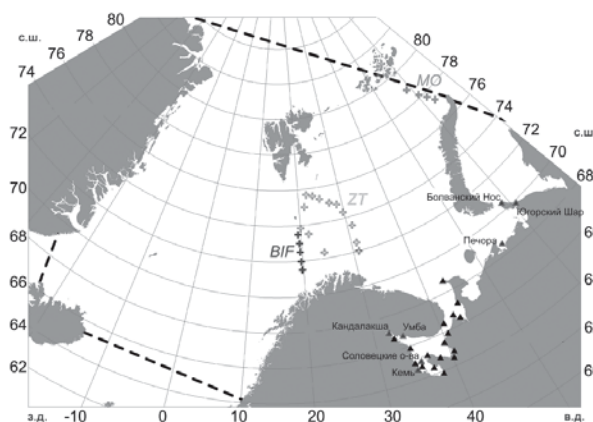


Рис. 1. Положение многосуточных буйковых измерений течения (крест) и уровенные посты (треугольник). Линией показана граница сеточной области модели морей Европейской Арктики

Для исследования нелинейных приливных явлений и для верификации результатов численной гидродинамической модели были использованы многосуточные данные измерений течений, выполненные в последнее десятилетие норвежскими исследователями.

В расположении буйковых станций, анализируемых в данной работе, можно выделить три района (рис. 1): пролив между северной оконечностью Новой Земли и архипелагом Земля Франца-Иосифа; станции, расположенные вдоль разреза от норвежского побережья до о. Медвежий; и станции, расположенные на шельфе Баренцева моря. Кроме того, в нашей работе использован большой объем данных измерений уровня на побережье Российской Арктики, выполненных сетью гидрометслужбы СССР. Анализируемые ежечасные и срочные ряды измерения уровня содержали пропуски. Для верификации модели и анализа приливных явлений по натурным наблюдениям нами были выбраны ежечасные данные с длиной ряда более 720 измерений. Таких станций оказалось 18 (рис. 1). Несколько отобранных рядов содержали ежечасные измерения длительностью более года, что позволяет нам оценить явление сезонной изменчивости констант прилива.

Помимо обработки большого массива данных инструментальных наблюдений за уровнем и течениями в нашей работе использовалось численное моделирование. Наша модель основана на программных алгоритмах известной модели Принстонского университета POM [11, 15], но содержит ряд существенных отличий. Построение сеточной области модели проводилось на поверхности эллипсоида вращения Красовского, что улучшает качество моделирования (эксперименты с сеточными областями, построенными на эллипсоиде вращения и шаре, показали некоторые различия, которые могут быть существенными при моделировании определенных типов явлений) [7, 14].

В связи с нелинейным характером изучаемых процессов на открытой границе моделей задавались импедансные граничные условия [8] для восьми основных волн прилива (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1). Сравнительный анализ результатов моделирования с применением импедансных граничных условий и условия осцилляции уровня показал, что отражения нелинейных гармоник от открытой границы существенно искажают параметры нелинейных эффектов. По-видимому, применение импедансных граничных условий является необходимым требованием для корректного воспроизведения нелинейных явлений.

Большие амплитуды прилива в некоторых районах морей Европейской Арктики вызывают периодическое затопление и высыхание больших по площади литоральных зон. Наблюдаемая в природе осушка мелководных районов в практике моделирования не учитывается напрямую из-за появления в численном решении отрицательных значений суммы $H + \xi$, где H – глубина моря, а ξ – отклонение свободной поверхности моря. Встроенная нами в модель процедура осушки берега показала надежную работу: приливная осушка Белого моря по результатам нашего моделирования совпадает с данными навигационных карт. Применение подобного механизма изменения береговой линии позволило нам не ограничивать пространственные границы модели изобатой 5 м, что существенно исказило бы морфометрические характеристики таких мелководных районов, как, например, Онежский залив, а следовательно, и изменило бы характеристики линейных и нелинейных приливных явлений. Таким образом, учет приливной осушки важен для точного моделирования линейных и нелинейных волн прилива.

Верификация модели производилась с использованием результатов гармонического анализа длительных рядов наблюдений за течениями на буйковых станциях (таблицы 1, 2 и 3) и данных прибрежных уровненных постов.

Таблица 1

Сравнение максимальной скорости приливных течений, измеренных на станциях ВІF, и модельных данных

Условное название станций	Данные		Модель		Разность амплитуд ΔV_{\max} , %	Разность фаз ΔP_{\max} °
	$M_2 \cdot V_{\max}$, см/с	Фаза M_2	$M_2 \cdot V_{\max}$, см/с	Фаза M_2		
BIF1, BIF1-1	17,17	177	17,77	180	-3,49	-3
BIF2, BIF2-2	15,17	165	14,90	8	1,78	-23
BIF3, BIF3-2	11,83	31	12,01	24	-1,52	7
BIF4, BIF4-2	10,32	37	11,16	34	-8,14	3
BIF5, BIF5-2	11,03	39	11,47	47	-3,99	-8

Примечание: ΔV_{\max} – расхождение (%) максимальной скорости течения по натурным и модельным данным; ΔP_{\max} – разность фаз максимальной скорости течения по натурным и модельным данным.

Таблица 2

Сравнение максимальной скорости приливных течений, измеренных на станциях ZT, и модельных данных

Условное название станций	Данные		Модель		Отклонение амплитуд ΔV_{\max} , %	Разность фаз ΔP_{\max} °
	$M_2 \cdot V_{\max}$, см/с	Фаза M_2	$M_2 \cdot V_{\max}$, см/с	Фаза M_2		
ZT01	13,22	75	14,77	71	-11,74	4
ZT02	13,7	68	13,6	67	0,9	1
ZT03	10,4	71	10,6	65	-1,7	6
ZT05	7,6	70	8,7	61	-13,9	9
ZT06	7,4	58	10,9	55	-47,6	3
ZT07	15,3	51	16,1	47	-5,4	4
ZT08	21,9	52	24,2	43	-10,5	9
ZT10	38,6	54	38,3	45	0,7	9
ZT11	14,0	50	14,2	50	-1,4	0
ZT12	9,0	48	11,1	48	-22,8	0
ZT13	15,2	44	16,8	39	-10,5	5

Примечание: ΔV_{\max} – расхождение (%) максимальной скорости течения по натурным и модельным данным; ΔP_{\max} – разность фаз максимальной скорости течения по натурным и модельным данным.

Таблица 3

**Сравнение максимальной скорости приливных течений,
измеренных на станциях МО, и модельных данных**

Станция, модель	$M_2 \cdot V_{\max}$, см/с	$S_2 \cdot V_{\max}$, см/с	$K_1 \cdot V_{\max}$, см/с	$O_1 \cdot V_{\max}$, см/с
МО1	1,92	0,67	1,98	1,28
Модель	2,29	0,81	1,79	0,91
МО2	1,73	0,63	1,27	0,59
Модель	1,36	0,53	1,18	0,72
МО3	1,69	0,54	1,06	0,53
Модель	1,81	0,72	1,22	0,65
МО4	3,89	1,18	1,81	0,93
Модель	3,47	1,41	1,80	0,69
ΔV_{\max} , %	14,61	22,39	8,08	24,84

Примечание: ΔV_{\max} – среднее для станций МО расхождение (%) максимальной скорости течения по натурным и модельным данным

Сравнение результатов моделирования и инструментальных данных показало хорошее качество моделирования, как приливного уровня, так и приливных течений.

На основе результатов моделирования с использованием комплекса программных продуктов анализа полей приливных характеристик были построены котидальные карты основных волн прилива, представленные на рис. 2 а. Максимальная амплитуда волны M_2 наблюдается в вершине Мезенского залива, этот регион (Воронка Белого моря и Мезенский залив) является как бы местом концентрации приливной энергии всей акватории Европейской Арктики, которая переносится сюда волнами Кельвина вдоль норвежского и мурманского побережья. Увеличенные амплитуды волны M_2 по сравнению с остальной частью морей Европейской Арктики отмечаются в прибрежных районах Гренландии, Исландии, Шпицбергена, норвежского и российского побережья Арктики, что также объясняется распространением приливной волны в виде волны Кельвина.

Наименьшие высоты главной лунной полусуточной волны расположены в амфидромических точках. Амфидромическая точка в Датском проливе между Исландией и Гренландией выражена ярко, несмотря на близость открытой границы; в центральных частях Баренцева (восточнее острова Медвежий) и Карского морей по результатам моделирования получены крупные амфидромические системы. Сравнительно небольшие амфидромии и узловые зоны отмечаются в Белом (возле Летнего и Онежского берегов), Баренцевом (около Чешской губы, юго-западной части Новой Земли, в районе Земли Франца-Иосифа) и Карском морях (в Байдарацкой губе у берега полуострова Ямал).

Большие полуоси эллипсов приливных течений волны M_2 максимальны в Воронке Белого моря и в районе шпицбергенской банки у островов Медвежий и Надежда, причем если в Воронке течения имеют реверсивный характер, то южнее Шпицбергена эллипсы течения близки к окружности и вращаются по часовой стрелке. Выделяется резкое увеличение скорости течений западнее меридианов $16-18^\circ$ в.д., что обуславливается наличием там шельфа Баренцева моря. Эллипсы течений в проливе между Шпицбергеном и Землей Франца-Иосифа также имеют большие значения максимальной скорости, и это также объясняется наличием шельфа в этом районе.

Пространственное распределение критерия Дуванина для морей Европейской Арктики показало, что на всей акватории доминируют полусуточные приливы. Неправильные полусуточные приливы отмечаются возле архипелага Земля Франца Иосифа, юго-восточной части Баренцева моря, юго-западной части Карского моря и в локальных зонах амфидромических точек, где характер прилива может быть суточным. Характерно, что в Белом море прилив правильный полусуточный, несмотря на

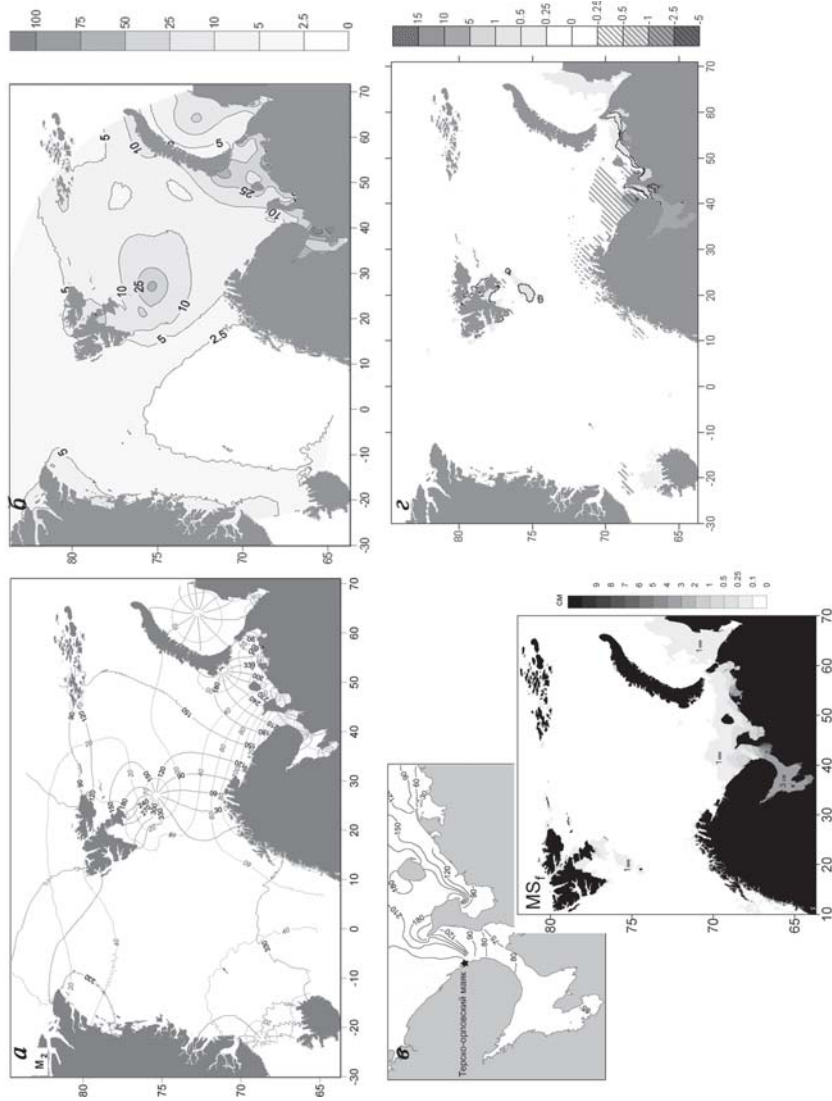


Рис. 2. Характеристики линейных и нелинейных приливных явлений в морях Европейской Арктики:

a – котидальная карта волны M_2 (амплитуда в сантиметрах, фаза в градусах); *b* – процентное отношение амплитуд нелинейных гармоник к сумме амплитуд основных волн прилива; *c* – котидальная карта нелинейной долгопериодной гармоники MS_1 для района Белого моря (амплитуда в сантиметрах, фаза в градусах); *d* – остаточный приливный уровень морей Европейской Арктики (см)

наличие амфидромии волны M_2 в Горле. Критерий Дуванина для максимальных приливных течений имеет более сложную пространственную структуру. Правильные полусуточные течения отмечаются в Баренцевом море, за исключением прибрежной части северного острова Новой Земли, где характер приливного течения доходит до неправильного суточного. Неправильный полусуточный характер отмечается в проливе Карские Ворота и северной части Байдарацкой губы. Отмечаются локальные зоны, где критерий Дуванина достигает значения 4, — это западное и северное побережье архипелага Шпицберген, район Лофотенских островов.

В результате нелинейного взаимодействия восьми основных волн прилива следует ожидать появления обертонов, остаточных эффектов, долгопериодных и короткопериодных гармоник. Как видно из рис. 3, суммарная амплитуда нелинейных гармоник составляет более 10 % от амплитуд основных волн в Белом море, юго-восточной части Баренцева моря, южнее архипелага Шпицберген, в центральной части Баренцева и Карского морей. Большое влияние нелинейных волн приурочено к амфидромическим и узловым точкам полусуточных волн, так, в районе амфидромии Белого моря сумма амплитуд нелинейных гармоник даже превышает амплитуды основных волн.

Определяющим свойством, характерным для всех долгопериодных нелинейных гармоник, является то, что угол положения увеличивается в сторону Баренцева моря из Белого моря, притом в самом бассейне и Горле Белого моря фаза достаточно однородна, например, для нелинейной гармоники MS_f фаза составляет $83-85^\circ$. Анализ амплитуд и изофаз долгопериодных гармоник показал, что возле Терско-Орловского маяка отмечается локальное уменьшение амплитуды и схождение котидалей (рис. 2 в): в этой точке расположена амфидромическая точка, образованная относительно большой волной, исходящей из Белого моря, и малой, распространяющейся вдоль Мурманского берега в Белое море.

Еще раз оговоримся, что долгопериодные гармоники, описываемые в статье, являются результатом нелинейного взаимодействия основных суточных и полусуточных гармоник, а не вызваны приливообразующей силой. Нелинейные долгопериодные приливные волны дополняют или искажают амплитуду «истинных» долгопериодных приливов.

В картине пространственной структуры остаточного приливного уровня, представленного на рис. 2 г, отслеживаются две обширные зоны положительного среднего уровня, совпадающие с районами со значимыми амплитудами нелинейных гармоник. Остаточный уровень превышает значение 5 мм в районе Белого моря, прибрежной зоны Печорского моря и вокруг Шпицбергена и шпицбергенской банки. Максимальное значение среднего уровня, обусловленного приливными явлениями, по данным моделирования, наблюдаются в вершине Онежского залива (более 5 см) и в вершине Мезенского залива, где остаточный уровень превышает 15 см. Для большей части Кандалакшского и Двинского заливов и в центральной части Белого моря средний уровень составляет около 4 см. Несколько меньшие значения среднего уровня отмечаются в Горле Белого моря: 2–3 см. Устойчивые отрицательные значения среднего уровня (до –5 см) наблюдаются в северной части Воронки Белого моря, между мысами Канин Нос и Святой Нос.

Как показали исследования [3, 5], амплитуды и фазы основных волн прилива в некоторых частях Мирового океана фактически не являются постоянными [2]: в изменчивости характеристик прилива отмечается выраженный, чаще всего годовой ход. Это явление вначале связывали исключительно с воздействием ледяного покрова [3, 5], однако впоследствии обнаружилось, что нередко наблюдается сезонная изменчивость гармонических постоянных и в морях свободных ото льда круглый год. Сейчас полагается, что значение констант прилива зависит от комплекса условий, формирующих изменчивость колебаний уровня, поля ветра, атмосферного давления, стока рек, ледовых условий [2]. Однако механизм изменчивости констант прилива до сих пор не изучен.

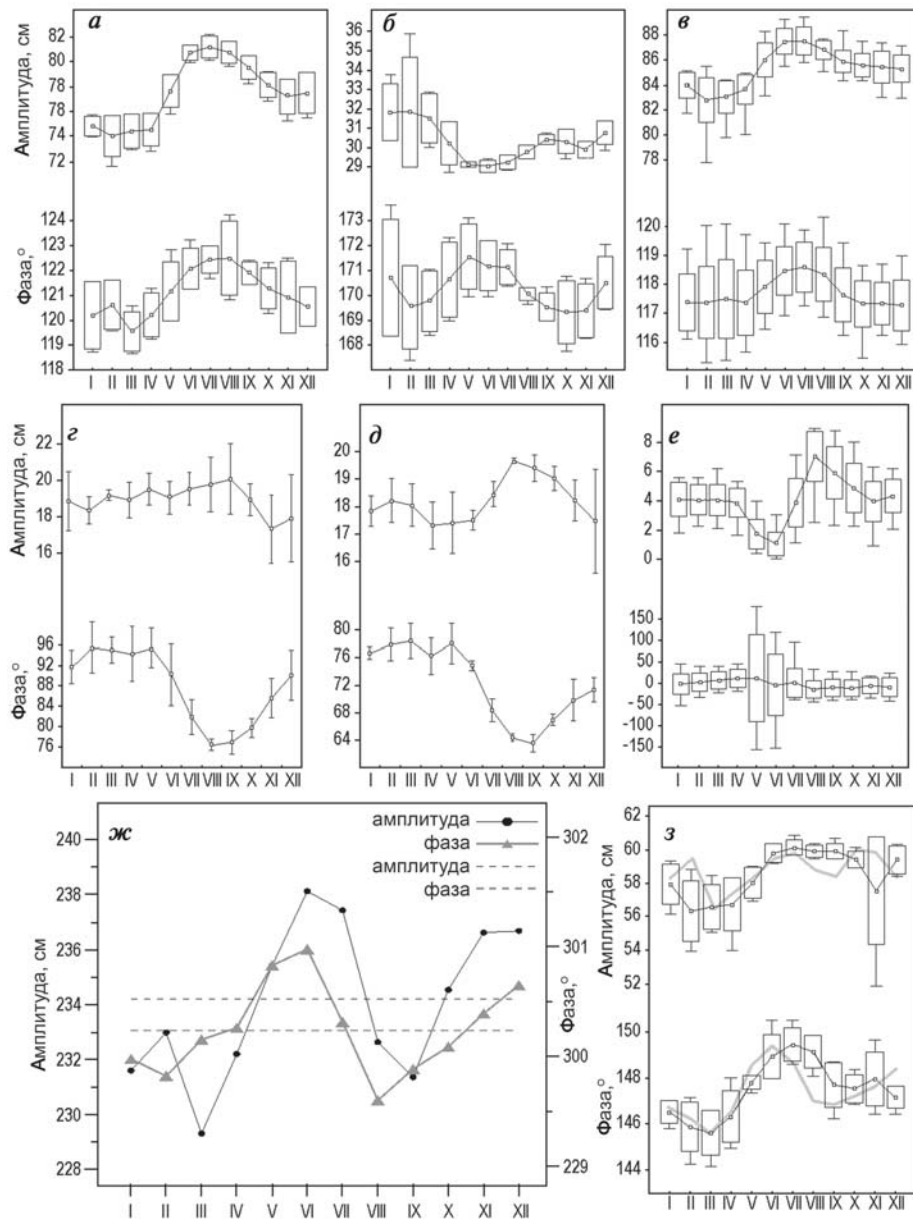


Рис. 3. Изменчивость амплитуды (верхний график) и фазы (нижний график) главной полусуточной волны M_2 в различных пунктах:

a – станция Кандалакша; *б* – станция Соловецкие острова; *в* – станция Умба; *г* – станция Югорский Шар; *д* – станция Болванский Нос; *е* – станция Печора; *ж* – эффект «изменчивости» гармонических постоянных в модельных данных, обусловленный модуляцией нелинейными гармониками (сплошной линией показаны оценки амплитуд (черная линия) и фаз (серая линия) по месячным реализациям, пунктирной линией – по реализации один год); *з* – сопоставление изменчивости гармонических постоянных по данным измерений на станции Кемь («ящики с усами») с результатами моделирования в точке, соответствующей станции Кемь (нижняя сплошная линия)

Для учета сезонной изменчивости приливов Г.Н.Войновым [2] была предложена аппроксимация сезонного хода амплитуд и фаз с помощью новых мелководных гармоник. Это позволило использовать для их выделения приемы гармонического анализа приливов и дало основание для правомочности и необходимости анализа длительных серий наблюдений. Устойчивость среднемесячных значений гармонических постоянных приливов и их индивидуальное поведение в конкретном пункте моря обусловлены особенностями сочетаний астрономических аргументов и фаз основной волны, модулирующих ее группы второстепенных волн [2]. Этим же объясняется индивидуальная форма кривых сезонного хода гармонических постоянных основных волн и причина несовпадения экстремумов в ходе амплитуды и фазы среднемесячных значений гармонических постоянных [2].

Для описания изменчивости констант прилива в данной работе были обработаны длительные измерения уровня в морях Европейской Арктики на станциях: Кемь (длительность ежечасных измерений 5 лет), Умба (длительность ежечасных измерений 17 лет), Кандалакша (длительность ежечасных измерений 3 года), Соловецкие острова (длительность ежечасных измерений 4 года), Болванский Нос (длительность ежечасных измерений 4 года), Югорский Шар (длительность ежечасных измерений 3 года), Печора (длительность ежечасных измерений 18 лет).

Анализ многолетних рядов проводился следующим образом: методом наименьших квадратов анализировались данные, длина которых соответствует одному месяцу, и по найденным гармоническим постоянным определялись оценки математического ожидания и дисперсии для двенадцати месяцев.

Как видно из рис. 3, на всех станциях отчетливо прослеживаются изменения угла положения и амплитуды полусуточной волны M_2 в различные месяцы. Причем на различных станциях отмечается индивидуальное распределение по сезонам величин амплитуд и фаз, часто не совпадающее с «классическим» распределением, – уменьшение амплитуды и увеличение фазы в зимний период [3, 5].

В годовом изменении амплитуды волны M_2 на станции Болванский Нос отмечается два максимума в феврале и в августе, причем второй максимум доминирует: колебание математического ожидания амплитуды волны M_2 составляет на станции Болванский Нос около 2,5 см, т.е. около 15 % от средней амплитуды. В изменении угла положения главной лунной полусуточной гармоники наблюдается уменьшение фазы в сентябре, кроме того, в годовом ходе можно также выделить незначительное уменьшение фазы в марте: максимальный размах изменчивости фазы на станции Болванский Нос составляет около 7°.

Схожая картина в изменении фазы отмечается на станции Югорский Шар – уменьшение угла положения в августе–сентябре на 10° по сравнению со значениями фазы в феврале–мае. Обе эти станции расположены на острове Вайгач, разделяющем Карское и Баренцево море; станция Болванский Нос установлена на одноименном мысе северной оконечности острова Вайгач в проливе Карские Ворота, а станция Югорский Шар в узком проливе, разделяющем остров и материк. В изменении амплитуды на станции Югорский Шар трудно выделить четкие закономерности.

Годовой ход амплитуды по данным измерений на станции Печорская Устьевая имеет один минимум в июне, а максимум в августе. Максимальный разброс составляет около 7 см, т.е. более 150 % при незначительной средней амплитуде волны M_2 . Безусловно, результаты анализа на этой станции сильно зашумлены стоком реки Печора.

На станции Кандалакша максимальные среднемесячные многолетние вариации амплитуды волны M_2 составляли 7 см, а наибольший разброс в годовом ходе амплитуды – более 10 см, т.е. примерно 10 % от средней амплитуды волны M_2 в этой точке. В годовом ходе наблюдается выраженный максимум в летние месяцы (июнь, июль, август) и слабый максимум в декабре. В изменении фазы

также отмечается максимум фазы в летние месяцы и второй максимум, более слабый, в феврале. Расхождение фаз волны M_2 составляет около 5° , а среднемесячное многолетнее — 3° . В нашем распоряжении было три годовых серии наблюдений за уровнем на станции Кандалакша, следовательно, возникает вопрос о достаточности трехлетнего ряда для корректного описания явления «изменчивости констант прилива». Станция Умба расположена рядом со станцией Кандалакша, но имеет более длительные ряды наблюдений — 17 лет. Максимальная амплитуда на станции Умба отмечается в летние месяцы (июнь, июль), а минимальная амплитуда в феврале—марте, следовательно, годовой ход амплитуды не является гармонической функцией. Максимальное расхождение в амплитуде волны M_2 составляет около 12 см, что примерно соответствует 18 % от средней амплитуды. Максимальное расхождение среднемесячной многолетней амплитуды на станции Умба составляет 5 см. В изменении фазы, так же как и для станции Кандалакша, наблюдается максимум в летние месяцы. Максимальная величина расхождения фазы волны M_2 составляет 5° , среднемесячное многолетнее расхождение — чуть более 1° . На станции Соловецкие острова годовой ход амплитуды противоположен ходу на станциях Кандалакша и Умба: минимальные амплитуды отмечаются в летние месяцы (май, июнь, июль) и максимальные амплитуды в январе—феврале—марте, причем годовой ход имеет еще один максимум в сентябре. Разброс амплитуд волны M_2 составляет 7 см, или 23 % от средней амплитуды. Максимальная величина расхождения среднемесячной многолетней амплитуды — 3 см. В годовом ходе угла положения выражены два максимума — по одному летом и зимой. Максимальный разброс значения фазы волны M_2 на станции Соловецкие острова составляет более 6° , а среднемесячный — около 2° .

Станция Кемь также расположена недалеко от Соловецкого архипелага. На этой станции имеет место увеличение амплитуды волны M_2 в летние месяцы и также кратковременное увеличение в декабре—январе. Наибольшая разность между минимальным и максимальным значениями амплитуды составляет 7 см, что соответствует примерно 12 % от средней амплитуды; среднемесячное многолетнее изменение амплитуды на станции Кемь оценивается в 3—4 см. В годовом ходе угла положения также отмечаются два максимума — наибольший максимум в летние месяцы и незначительное увеличение в ноябре. Наибольший разброс в значении фазы — 7° , а межгодовые среднемесячные вариации фазы — 4° .

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что разброс значений амплитуды, рассчитанной по ряду инструментальных наблюдений длиной один месяц, может превышать 10 % от амплитуды, вычисленной по годовым рядам; разброс значений угла положения также превышает 5° . Существует зависимость, по которой происходит изменение амплитуды и фазы, причем эта зависимость индивидуальна для различных пунктов, даже расположенных в одном районе. Как правило, на рассмотренных станциях отмечается два максимума в изменении фазы, при доминировании одного из максимумов. На большинстве беломорских станций максимум фазы отмечается в летние месяцы, в то время как на станциях Югорский Шар и Болванский Нос наибольшая фаза наблюдается в зимние месяцы.

Возможно, что причиной «изменчивости» констант прилива может служить модуляция основных волн прилива нелинейными гармониками, имеющими частоту, близкую к частоте основных волн. Например, очевидно, что волна M_2 может модулироваться нелинейными волнами OP_2 , $2MS_2$ (μ_2), $2MN_2$ (L_2) и др.

Для оценки модуляции основных волн прилива нелинейными гармониками были проведены сравнения амплитуд и фаз основных волн, рассчитанных по модельным рядам различной длины. На рис. 3 же представлен годовой ход амплитуды и фазы главной лунной полусуточной волны M_2 в точке, соответствующей центру Мезенского залива. Отмечается наличие двух максимумов в годовом ходе

амплитуд и фаз. При этом следует помнить, что в эксперименте кроме восьми основных волн прилива ничего больше не задавалось (т.е. отсутствуют речной сток и атмосферное воздействие). Данная «полугодовая» периодичность обусловлена, скорее всего, модуляцией основной волны нелинейной волной OP_2 , которая может быть результатом нелинейного взаимодействия двух волн O_1 и P_1 или даже результатом трехволнового взаимодействия K_2 , M_2 и S_2 .

На рис. 3 з представлен годовой ход амплитуды и фазы волны M_2 , рассчитанный по данным анализа инструментальных рядов измерений уровня на станции Кемь, и данные годового хода, определенного по модельным данным. На графике вертикальный масштаб колебания амплитуд и фаз модельных данных изменен по сравнению с данными инструментальных наблюдений. Это пришлось сделать, для того чтобы можно было выявить общие закономерности годового хода гармонических постоянных, определенных по модельным и инструментальным данным. Как видно из рисунка, прослеживаются некоторые общие черты в изменчивости констант прилива модельных и инструментальных данных. Безусловно, в натуральных данных присутствует результат воздействия атмосферы, речного стока, стерических колебаний и ледяного покрова, что и объясняет различие инструментальных и модельных данных. Тем не менее, сопоставляя размеры вертикальных колебаний, можно определить, что вклад чисто нелинейноволновой модуляции составляет на станции Кемь 37 % от общей изменчивости амплитуды и около 50 % от изменчивости фазы.

Описанная выше модуляция обуславливается внутренними, нелинейными эффектами и устраняется дополнительным учетом новых гармоник при проведении гармонического анализа. Данное явление следует приписывать не природным явлениям, а некорректности анализа изменчивости констант прилива по месячным наблюдениям. Безусловно, подобное утверждение относится только к взаимодействию исключительно приливных волн, но если же во взаимодействие будут вступать основные приливные волны и неприливные явления, например сезонный ход уровня моря или ледяной покров, то тогда действительно правомочно говорить об изменчивости гармонических постоянных.

Статья подготовлена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ-04-05-64765.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андросов А.А., Вольцингер Н.Е., Либерман Ю.М. Двумерная приливная модель Баренцева моря // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 1. С. 20–26.
2. Войнов Г.Н. Приливные явления в Карском море. СПб.: РГО, 1999. 117 с.
3. Дворкин Е.Н. Мандель С.З. О влиянии ледяного покрова на изменчивость констант приливов // *Тр. ААНИИ*. 1989. Т. 414. С. 215–244.
4. Зильберштейн О.И., Сафронов Г.Ф., Попов С.К. Исследования приливных движений в Баренцевом море на основе гидродинамического моделирования // *Тр. ГОИН*. 2000. Вып. 207. С. 81–102.
5. Коптева А.В. Влияние ледяного покрова на скорость распространения приливной волны // *Доклады Юбилейной сессии Ученого совета Арктического института*. Л.; М. 1945. С. 7.
6. Кравец А.Г. Модель крупномасштабной баротропной циркуляции в мелководном окраинном море // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 11. С. 84–91.
7. Май Р.И. Влияние выбора геодезической основы сеточной области на результаты математического моделирования // *Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов мирового океана*. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2004. С. 24–28.
8. Некрасов А.В. Энергия океанских приливов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 288 с.
9. Некрасов А.В. Приливные волны в окраинных морях. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 247с.

10. Прошутинский А.Ю. Колебания уровня Северного Ледовитого океана. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 216 с.
11. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dimensional coastal ocean models. Coastal and estuarine sciences: Vol. 4. / N.Heaps, ed., American Geophysical Union, Washington, D.C. 1987. P. 208.
12. Gjevik E. Nost, Straume T. Model simulations of the tides in the Barents Sea // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. № C2. P. 3337–3350.
13. Kowalik Z., Proshutinsky A.Y. The Arctic Ocean Tides // The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment. Geophysical Monograph. American Geophysical Union. 1994. Vol. 85. P. 137–158.
14. May R.I. Simulation of climate significant nonlinear tidal phenomena in the Euro Arctic seas // IEEE OCEANS'05 EUROPE Conference proceedings. Oceanography: Modeling & Data Processing Brest, France. June 20–23. 2005. 041127-01. P. 1–6.
15. Mellor G.L. A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Users guide. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences. Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710. 2003. 53 p.
16. Padman L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. № 2. L0230310.1029/2003GL019003.
17. Popov S.K., Safronov G.F., Zilberstein O.I., Tikhonova O.V., Verbitskaya O.A. Density and residual tidal circulation and related mean sea level of the Barents Sea // IOC Workshop Report № 171. Annex III. 1999. P. 106–131.

R.I.MAY

LINEAR AND NONLINEAR TIDAL PHENOMENA IN THE EURO-ARCTIC SEAS

On the base of instrumental observations and simulation results the linear and nonlinear tidal phenomena of Euro Arctic seas are described. Residual tidal level, amplitudes and phases of nonlinear long-period harmonics and contribution of nonlinear-wave-modulation to formation of variability of harmonious constants of the basic waves are estimated.

Keywords: tides, nonlinear phenomena, Norwegian Sea, Barents Sea, White Sea.