

## Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля

В.Н. Храмушин,

*Крыловские чтения - 2007 г.*

Дальневосточные морские рубежи России характеризуются высокой штормовой активностью, существенно повышающей требования по мореходности к океанскому кораблю. Актуальность исследований штормового мореходства обусловлена широкомасштабным освоением нефтегазовых ресурсов сахалинского шельфа. Отсутствие обустроенных портов-убежищ на северо-восточном побережье о-ва Сахалин повышает востребованность научных исследований в области создания систем оперативного контроля обстановки на море; повышения эффективности и безопасности штормового мореходства; оптимизации проектных решений для новых кораблей и судов улучшенной мореходности.

Board Navigation System for the Atmosphere, Ocean and Ship Seaworthiness Monitoring.  
*Vasily Khramushin. Khram@Mail.ru*

The Russia Far East maritime domain are specified as the high stormy sea activity, greatly raising requirements for the safety of ship seaworthiness. Necessity for the sea storming of ship researches is a condition to extensive development of oil and gas field resources on the Sakhalin shelf. The safe harbour deficiency on the Sakhalin isl northeasterly seaside will give raise to demand marine researches for a sea phenomena monitoring; for an efficiency and safety stormy sea navigating; for the optimization of design decisions for order a new improved seakeeping vessels.

**Ключевые слова:** гидрометеорология, мореходность, навигация, опасные морские явления, робототехника, телемеханика, телеметрия, штормовое плавание.

**Обозначения:**  $\lambda$  [m],  $\tau$  [s],  $h$  [m],  $A$  [°] – длина, период, высота и направление движения морской волны;  $L$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $D$  [m]– длина, ширина, высота борта и осадка морского гидрофизического модуля.

### Предисловие

Дальневосточные моря России относятся к наиболее активным геоструктурным элементам земного шара, где непрерывно регистрируются землетрясения, действуют надводные и подводные вулканы, где море угрожает штормовыми волнами зыби и цунами, нагонами и экстремальными течениями вблизи побережья, частыми ураганами и тропическими тайфунами. Отсутствие должной навигационной и гидрометеорологической информации приводит к многочисленным прибрежным разрушениям и гибели судов с человеческими жертвами. Российский флот, работающий в морских акваториях Сахалинской области и Дальнего Востока России, должен обладать достаточной мореходностью и способностью к длительному автономному плаванию в условиях дальневосточных ураганных штормов, обледенения или тяжелых льдов, без надежды на возможность укрытия в надежных портах-убежищах. Такие условия освоения морских ресурсов суще-

ственно усложняют условия развития морских коммуникаций и морских работ на шельфе Сахалина и Курил, требуя повышенного внимания, как к обустройству морских акваторий, так и к навигационно-техническому оснащению морских судов.

Можно сформулировать актуальные направления морских исследований [1], нацеленных на повышение эффективности и безопасности мореплавания в дальневосточных морях России: 1) построение эффективной системы мониторинга морских акваторий, в том числе обеспечивающей ходовые вахты всех судов достоверной информацией о текущей обстановке на море, о прогнозах динамики изменения состояния моря и атмосферы; 2) создание специальной судовой измерительной и счетно-решающей аппаратуры, оценивающей состояние моря, атмосферы и их взаимодействие с движущимся кораблем, и способной выполнять роль бортовой экспертно-аналитической системы, рекомендующей судоводителю наиболее эффективные методы решения поставленных перед судном задач; 3) поиск новых непротиворечивых методов проектирования специализированных кораблей и судов, наилучшим образом приспособленных к выполнению морских работ в штормовых условиях Дальнего Востока России.

Внедрение в морскую практику автоматизированных систем мониторинга больших по площади морских акваторий и современных навигационных комплексов контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля, является одним из ключевых условий повышения эффективности дальневосточных морских коммуникаций в целом, с неременным условием обеспечения безопасности штормового мореплавания на каботажных маршрутах у Сахалина и Курильских островов.

### **Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля**

Корабельный вариант метеостанции в комплекте с датчиками регистрации динамики корабля на волнении может составить основу универсальной бортовой аппаратуры для определения состояния моря, атмосферы и динамики их взаимодействия с движущимся кораблем. Автоматически формируемый пакет гидрометеорологических данных, доставляемый по телеметрическим каналам связи в морские службы капитанов порта и в морские отделы управлений гидрометеослужбы, сможет образовать ключевой поток информации для использования в прогнозах опасных морских явлений вблизи побережья, а при необходимости и для выработки рекомендаций судоводителю о наиболее эффективных маршрутах и режимах плавания в открытом море. Эта же информация о динамике судна и состоянии моря в исходном виде, дополненная интегральными оценками условий плавания из береговых служб, может быть востребована судоводителем для решения навигационных задач; для повышения эффективности и безопасности штормовой эксплуатации корабля.

В 2001-2004 гг на борту гидрографических судов ГС-210 и ГС-47, при активном участии сахалинских гидрографов, а в 2006 г. на борту НИС «Профессор Богоров» при поддержке нефтепромышленной компании «Сахалинская энергия», проводились длительные по времени наблюдения за динамикой судна, поверхности моря и атмосферы.

Бортовой комплекс измерительной аппаратуры был образован современными, но вполне общедоступными измерительными датчиками, навигационными и гидрометеорологическими

приборами, позволившими сформировать следующие массивы цифровых данных за весь период морской экспедиции:

- Измерение углов крена и дифферента датчиками ДК-1 гравитационного типа с точностью до  $0,01^\circ$  и частотой записи порядка 10-12 отсчетов в секунду;
- Измерение углов рыскания и параметров качки с использованием магнитометров типа HMR-3300 в качестве безынерционных компаса и инклинометров, работающих с точностью до  $0,1^\circ$  и частотой записи до 10 отсчетов в секунду<sup>1</sup>;
- Изменение относительных координат, скорости и направления движения судна с использованием приемников GPS с точностью до  $\pm 1$  м с интервалом 1 с;
- Автоматическая метеостанция с цифровым выходом на ЭВМ обеспечивала ежеминутные записи скорости ветра с точностью  $\pm 0,1$  м/с, его направления -  $\pm 2$  румба; давление атмосферы -  $\pm 0,1$  мб и др.
- Бортовой навигационный или гидрографический эхолот с цифровым выходом, если таковой имелся на судне, обеспечивал регистрацию глубины моря с частотой от 2-3 до 0,5 отсч/с., в зависимости от глубины под килем судна.



ДК-1А



GPS Receiver



HMR-3300



WS-2300

Для сопоставления измеренных данных с реальным состоянием моря регулярно проводились визуальные наблюдения за параметрами морского волнения и зыби с периодичностью от 1 до 4 часов и только в дневное время. В экспедиции 2006 года также был собран полный комплект гидрометеорологических карт с приземным анализом и суточным прогнозом полей ветра и волнения по северо-западной части Тихого океана и Охотскому морю. За этот же срок позже поступили карты поверхностных течений и колебаний уровня моря по данным дистанционного мониторинга поверхности океана системы «Топекс-Посейдон», собранные сотрудниками кафедры океанологии Санкт-Петербургского университета.

В результате были собраны экспедиционные материалы, вполне достаточные для обоснованного анализа состояния моря; для изучения процессов взаимодействия корабля, океана и атмосферы, необходимые для поиска вариантов оптимального управления судном и обеспечения безопасного плавания в условиях интенсивного волнения, а также для проверки вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновой динамики уровня моря с целью разработки прогноза опасных морских явлений в мелководных шельфовых акваториях.

Включение в непрерывное использование вышеперечисленных данных и анализ этой информации может позволить оперативно решать широкий круг навигационных и гидрофизических задач:

<sup>1</sup> Магнитометр HMR-3300 использовался в море только в экспериментальном режиме, и в описываемых экспедициях не задействовался для сбора больших массивов данных о динамике судна на волнении еще и потому, что он заметно уступает по точности гравитационным инклинометрам типа ДК-1.

а) автоматический сбор, обработка и передача оперативной информации о состоянии моря и атмосферы по телеметрическим каналам связи на береговые центры, в соответствии с регламентом работы судовых гидрометеопостов;

б) применение измерительного комплекса и оборудования связи с береговыми метеоцентрами в качестве автоматизированной экспертной системы для анализа режимов безаварийного плавания и оптимизации хода судна в условиях штормового волнения;

в) автоматизированная подготовка начальных и граничных условий для проведения специализированных и адаптированных к конкретным акваториям вычислительных экспериментов по моделированию процессов взаимодействия атмосферы и океана, в том числе для прогноза развития опасных морских явлений;

г) анализ волнового режима вблизи морских портов и на удаленных морских акваториях с использованием сети прибрежных гидрофизических станций, сочетаемых с параллельными наблюдениями с борта морских судов, проходящих вблизи контролируемого побережья.

Первые три задачи могут со временем утверждаться Росгидрометом к регламентному использованию на прибрежных и судовых гидрометеостанциях. Последняя задача может эффективно применяться в гидрографических изысканиях при проектировании новых портов, при подготовке к проведению дноуглубительных работ и реконструкции морских портов и гаваней. Для морских научных исследований оптимально было бы применять опытные образцы усовершенствованных гидрометеостанций, что позволит испытать новое оборудование в реальных морских условиях, и создаст условия для более частого использования в научных изысканиях современной техники, в том числе с целью изучения необычных морских явлений.

### **Групповая структура трохоидальных волн и зыби в открытом море**

В практическом судовождении традиционно используются модели волнения, которые представляются в виде наложения нескольких независимых систем волн: 1) ветровое волнение совпадает с направлением действия ветра, а высота волн может быть предельно большой; 2) две-три системы волн зыби, являющихся отголосками ранее прошедших или отдаленных штормов, при этом длина волн зыби обычно существенно больше, чем у ветровых, а крутизна – меньше.

Геометрическая форма гравитационных волн на глубокой воде, в соответствии с теорией Герстнера, может быть оценена с помощью параметрического определения движущихся по циклоидам с переменным радиусом частиц жидкости:

$$\begin{aligned}x_w(a, x, z) &= x - a \cdot \sin(x \cdot 2\pi / \lambda) \cdot \exp(2\pi \cdot (z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) - a) / \lambda); \\z_w(a, x, z) &= z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) \cdot \exp(2\pi \cdot (z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) - a) / \lambda),\end{aligned}\tag{1}$$

где:  $x_w, z_w$  – расчетные аппликата и абсцисса частиц жидкости, включившихся в волновое движение из положения покоя с изначальными координатами  $x, z$ ;  $a$  – коэффициент амплитуды, относительно теоретического максимума:  $A = a \cdot 1,134 \cdot \lambda / (4\pi)$ . Область определения аргументов  $a$  и  $x$  ограничена:  $0 < a \leq 1,0$ ;  $z \leq 0$ . Если коэффициент амплитуды будет задан отрицательной величиной:  $a < 0$ , то это изменит фазу волны на  $180^\circ$ , что признано нежелательным для сохранения однородной структуры волнового поля, а при необходимости такого изменения фазы можно прибавить к абсциссе половину длины конкретной волны:  $\lambda/2$ .

Для эмпирического построения профиля групповой структуры волнения можно сложить две системы регулярных трохоидалных волн. При этом вторая система наложенных волн будет отличаться множителем при определении фазы волны:  $x' = x \cdot 0,889$ , и несколько уменьшенной амплитудой:  $a' = a/1,286$ .

$$\begin{aligned} x_G &= x_w - a' \cdot \sin(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot \exp(2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda); \\ z_G &= z_w + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot \exp(2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda), \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитудные коэффициенты трохоидалных волн подобраны так, чтобы при  $a=1,0$  угол склона вблизи вершины регулярной волны (1) достигал  $30^\circ$ , а в случае групповой структуры волн (2) угол склона вблизи вершины «девятого вала» приближался к  $60^\circ$ .

При построении пространственной картины волнового поля можно использовать профили групповых структур волн, дополнительно закладывая в математическую модель длину волнового фронта тем больше, чем меньше амплитудный коэффициент  $a$ , что будет соответствовать наблюдаемому на море вытягиванию и выположиванию фронтов морской зыби.

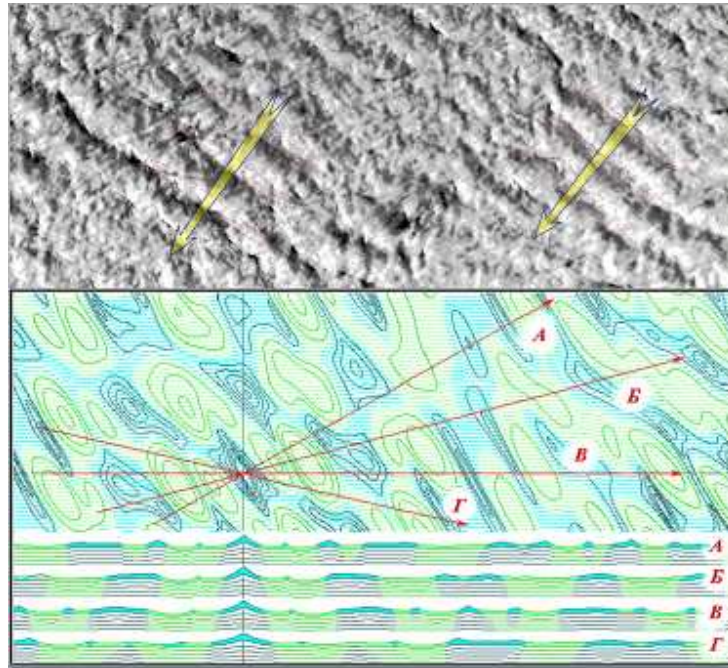


Рис. 1. На аэрофотоснимке (вверху) стрелками отмечены две тройки наиболее крупных ветровых волн («девятых валов»). Ниже приведено волновое поле математической модели, представляющей наложение трех ячеисто-групповых структур трохоидалных волн: ветровых ( $\lambda=60\text{м}$ ,  $\tau=6,2\text{с}$ ,  $h=7,2\text{м}$ ,  $A=250^\circ$ ); первой и второй систем зыби ( $\lambda=100\text{м}$ ,  $\tau=8,0\text{с}$ ,  $h=5,9\text{м}$ ,  $A=210^\circ$  и  $\lambda=160\text{м}$ ,  $\tau=10,1\text{с}$ ,  $h=5,1\text{м}$ ,  $A=270^\circ$ ). Изолинии уровня моря проведены через 2 м. Курс движения судна в направлении А ведет навстречу ветровому волнению, курсы Б, В и Г – на  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  вразрез волне. В нижней части рисунка показаны профили волн на отмеченных курсах А, Б, В и Г

Показанная на рис.1 волновая картина вполне соответствует наблюдениям за реальным штормовым волнением в открытом море (рис.1, фото вверху), когда групповые структуры ветровых волн и волн зыби наиболее активны и следуют ячеистыми порядками с ярко выраженными гребнями «девятых валов». Вертикальной линией в нижней части рисунка 1 помечена теоретиче-

ски максимальная волна, которая может быть названа «волной-убийцей». Но все же реальное морское волнение не является катастрофичным, судоводителю всегда предоставляются большие участки штормового моря, на которых отсутствуют особо крутые волны, и где позволительно активное маневрирование судна, в том числе для активного уклонения от встречи с особо крупными волнами.

На ходу корабля обычно 2-3 «девятого вала» проходят по борту, и лишь после этого происходит прямое столкновение с особо крупной волной (при условии, что рулевой не ведет корабль «по кочкам»). Принимая характерный период штормовых волн Охотского моря равным 8 с., получаем, что для уклонения от жесткой встречи с крупной волной необходима заблаговременность прогноза «девятого вала» порядка 1-1,5 минут, что вполне может быть осуществимо с использованием вычислительных мощностей современных микропроцессоров.

Как на аэрофотоснимке, так и на эмпирическом волновом поле хорошо просматриваются короткие и крутые ветровые волны, а для обнаружения фоновых волн зыби судоводителю обычно приходится подниматься на верхний мостик корабля. В ночное время никаких параметров волнения определить практически невозможно. В таком случае становится актуальной проблема автоматического определения параметров штормового волнения.

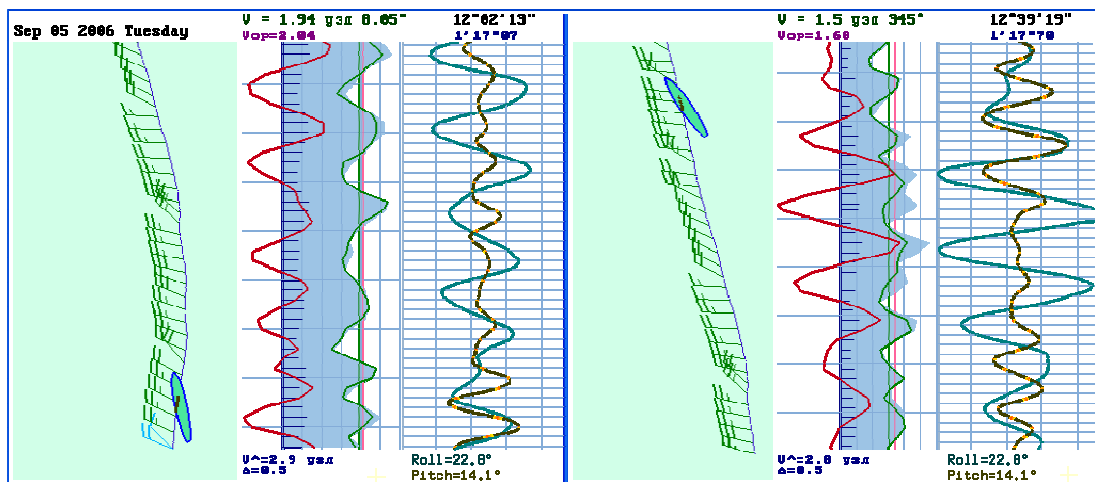


Рис. 2. Регистрация динамики качки и ходкости морского судна на переходе по сахалинскому шельфу в свежую погоду. На кривых справа показано изменение крена и дифферента судна, которое сопоставляется с величиной скорости хода судна (на кривых слева), измеряемой с помощью приемника GPS. На левом поле приведена карта с маршрутом судна, на котором нанесены ежесекундные отметки направления и скорости ветра, достигающего 10-12 м/с.

В качестве простого и надежного регистратора волнения может выступать сам корпус корабля, активно раскачивающийся на волнении. По рис.2 можно отметить синхронность изменения углов килевой и бортовой качки, измеряемой бортовыми инклинометрами, и пульсаций скорости хода, определяемых по приращению географических координат судна.

Обычно параметры собственных вертикальных колебаний, рыскания и качки могут быть без труда вычислены предварительно - по текущей весовой загрузке корабля и кривым элементов теоретического чертежа судна. В плавании на интенсивном волнении эти параметры должны адаптироваться к большим углам крена и дифферента по реальным записям регистрирующих

приборов (рис.2). Такое уточнение может быть выполнено с помощью процедуры идентификации параметров дифференциальных уравнений качки корабля.

Простая и быстрая оценка параметров наиболее действенных для корабля волн может быть сделана по записям килевой качки судна, которая, ввиду малости периода собственных колебаний корпуса должна в точности прописывать форму морских волн, соизмеримых с длиной корабля. Для более точного или прямого измерения характеристик волнения необходимо использование одного или нескольких забортных волнографов.

Анализируя принятую модель штормового волнения, можно сделать вывод о том, что для восстановления реальной картины волнообразования необходимо провести замеры килевой качки корабля в секторе курсов не превышающем  $\pm 30^\circ$ . В штормовом плавании в таком же секторе происходит естественное рыскание корабля на курсе, что обычно не представляет дополнительных угроз для безопасности штормования. Сектор курсов для маневрирования при уклонении от девятых валов находится в пределах  $\pm 15^\circ$ , что вполне достижимо по времени реагирования движущегося судна при своевременном переключении руля.

Путевая регистрация и анализ параметров качки и пульсаций скорости хода судна, сопоставление их с нагрузкой на движителях и динамикой переключений руля, создают необходимую информационную базу для оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и для поиска обоснованных решений при выборе безопасных режимов штормового плавания. По мере накопления данных о штормовой динамике судов с различными обводами, они могут быть использованы при поиске оптимальных проектных решений о форме корпуса и общекорабельной архитектуре новых кораблей. Это особенно важно для специализированных проектов судов, в которых функциональные требования к бортовому оборудованию или к условиям морского базирования не могут быть в полной мере согласованы с требованиями безопасности в штормовом плавании.

Сопутствующий анализ перемещений корпуса и изменений скорости хода судна на поверхности моря с периодами от 3 до 12 минут, позволяет определить интенсивность длинноволновых пульсаций скорости поверхностных течений. Это может быть использовано с целью краткосрочного прогноза морских наводнений и экстремальных течений на близлежащих к маршруту движения судна акваториях мелководного прибрежного шельфа.

### **Длинноволновая динамика мелководных шельфовых акваторий**

Также как и для расчета периодов собственных колебаний корпуса корабля, можно произвести предварительные оценки резонирующих свойств участков морского побережья, на которых аккумулируется энергия колебаний уровня моря в длинноволновом диапазоне периодов от 2 до 15 мин. С этой целью, для охотоморской акватории северо-восточного шельфа о-ва Сахалин проведено длительное по времени моделирование длинноволновых процессов в самом широком спектре волн, подверженных как излучению через свободные границы расчетной области, так и затуханию вблизи побережья. После численного моделирования в остатке обнаружились четко выраженные аккорды собственных колебаний уровня моря, характеризующие геометрические

особенности конкретных участков прибрежных мелководий. При этом остаточные спектры носят четко выраженный полосовой характер (рис.3).

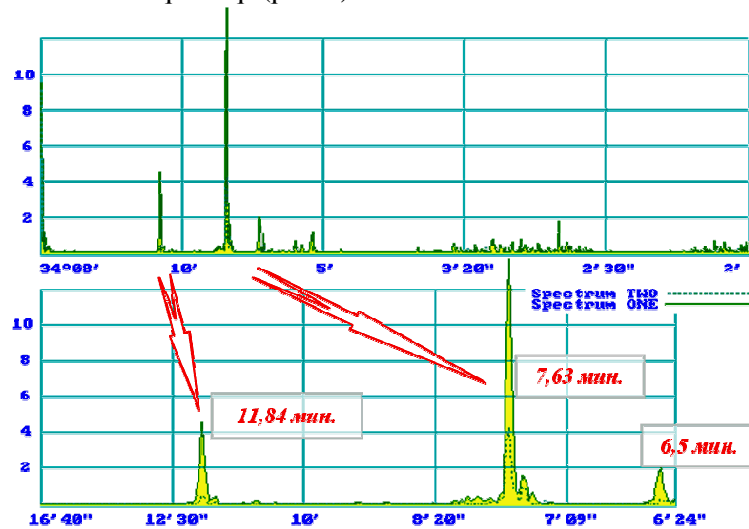


Рис. 3. Энергетические спектры для характерных периодов длинных волн, способных длительное время сохраняться или аккумулироваться на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин. На верхнем графике показан спектральный диапазон в интервале от 2 до 34 мин, на нижнем – те же спектральные оценки в растянутом виде в диапазоне от 6 до 16 мин.

Выявленные в результате вычислительного эксперимента аккорды собственных длинноволновых колебаний отражаются во всех точках регистрации уровня моря (рис.3), равномерно распределенных по всей расчетной области, где каждая из обнаруженных волн имеет характер стоячей волны, и изменяет энергетический уровень относительно других волн внутри аккорда только при изменении местоположения точек регистрации вдоль побережья. Картирование величины интенсивности энергетических спектров для обнаруженных волн показывает их точную привязку к конкретным локальным участкам вблизи побережья (рис.4).



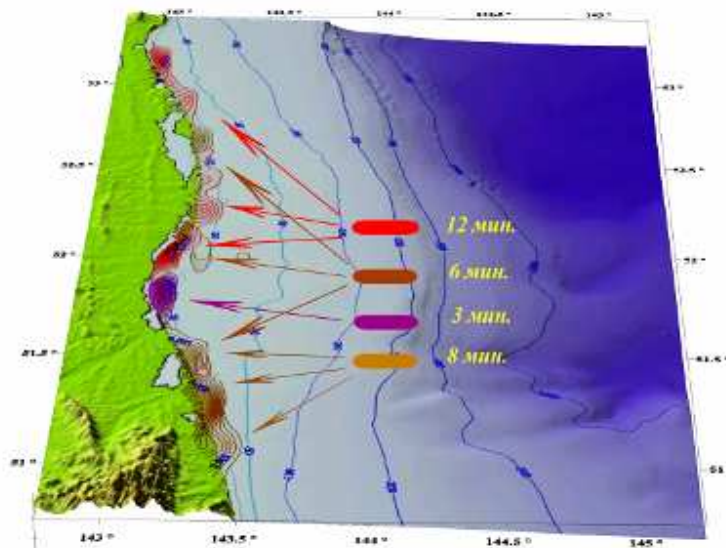


Рис. 4. Пространственная привязка резонирующих участков акватории северо-восточного шельфа о-ва Сахалин, способных к усилению и аккумуляции длинноволновой энергии от внешних источников возмущения с периодами 12', 8', 6' и 3' мин.

Таким образом, появляется возможность своеобразной идентификации местоположения судна вблизи побережья по характеру изменения его скорости хода, а также дальнего обнаружения интенсивного воздействия штормовых волн на удаленные участки прибрежных мелководий, в которых возбуждаются связанные аккорды длинных волн, проявляющиеся затем в неизменном виде на очень больших удалениях от места зарождения.

Полученные в вычислительном эксперименте длинноволновые колебания уровня моря устойчиво проявляются при проведении экспедиционных наблюдений за пульсациями вдольбереговых течений в свежую погоду, если судно проходит вдоль изобат с глубинами порядка 10 - 20 м. При этом изменение скорости хода происходит в темпе предсказанных длинных волн и достигает величин от  $\pm 1$  до  $\pm 2$  узлов (рис.5). Аналогичное повышение интенсивности длинноволновых процессов на сахалинском шельфе может наблюдаться при прохождении штормов над шельфом Южных Курильских островов, откуда по глубоководной Курильской котловине происходит перекачка энергии словно по добротному волноводу. В тихую погоду, все проявления длинноволновых процессов на сахалинском шельфе, который является полностью открытым со стороны Охотского моря, утихают примерно через сутки после окончания шторма.

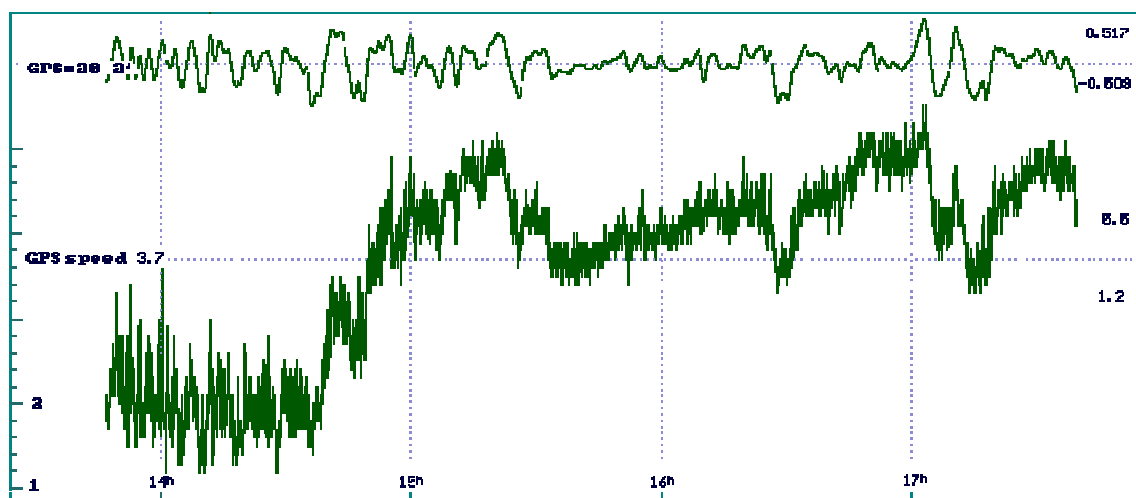


Рис. 5. Графики изменения скорости хода судна по сахалинскому шельфу вдоль изобаты 15 м по маршруту, показанному на рис.2. На нижнем графике представлена скорость хода судна по показаниям приемника GPS, которая изменяется при выходе судна из залива Чайво с 2 узлов до 4-5 узлов. На верхнем графике из показаний скорости отфильтрованы все пульсации скорости с периодами менее 2 мин и более 20 мин, после чего отчетливо проявляются 12-минутные пульсации скорости хода, достигающие даже на сглаженных кривых величин порядка 1 узла.

Проведенные исследования подтверждают возможность использования морского судна в открытом море в качестве измерительного датчика для оценки состояния моря. Это возможно при анализе динамики судна и его взаимодействия с взволнованной поверхностью моря в широком диапазоне волн, как на глубокой воде, так и волн длинных, пронизывающих всю толщу прибрежных вод. Унифицированные навигационно-гидрометеорологические комплексы дают возможность на качественно новом уровне регулировать ходкость корабля в условиях интенсивного волнения, а также своевременно определять безопасные режимы хода в сложных навигационных или штормовых условиях. Эта же информация о динамике корабля, поверхности океана и атмосферы может стать ключевой для обеспечения прогнозов опасных морских явлений на побережье; для предотвращения штормовых аварий на морских инженерных сооружениях и для обеспечения эффективности и безопасности на подконтрольных морских коммуникациях в целом.

Отметим здесь, что использование крупных судов в качестве измерительных приборов для оценки текущего состояния моря не всегда экономически оправданно. Нередко при проведении морских работ все обслуживающие суда становятся на якорь, или ложатся в дрейф, отчего качество измерений динамических процессов на поверхности моря либо значительно ухудшается, либо и вовсе становится неприемлемым.

Для разрешения этой проблемы изучена возможность использования сверхмалых автономных и телеуправляемых гидрофизических модулей. Они способны проводить аналогичные измерения навигационно-гидрометеорологических параметров в автоматическом режиме плавания, удаляясь на десятки километров от пункта сбора телеметрической информации в режиме телеуправления, или даже уходя в дальнее автономное плавание под контролем бортовых компьютеров, обеспечивающих регулярную связь с береговыми центрами по каналам дальней или космической радиосвязи.

При проектировании таких автономных гидрофизических модулей вопросы штормовой мореходности становятся определяющими, так как для сверхмалых судов практически любое волнение на море становится подобием ураганов в отношении обычных крупных судов - прототипов.

### **Оптимальные проекты телеуправляемых гидрофизических модулей.**

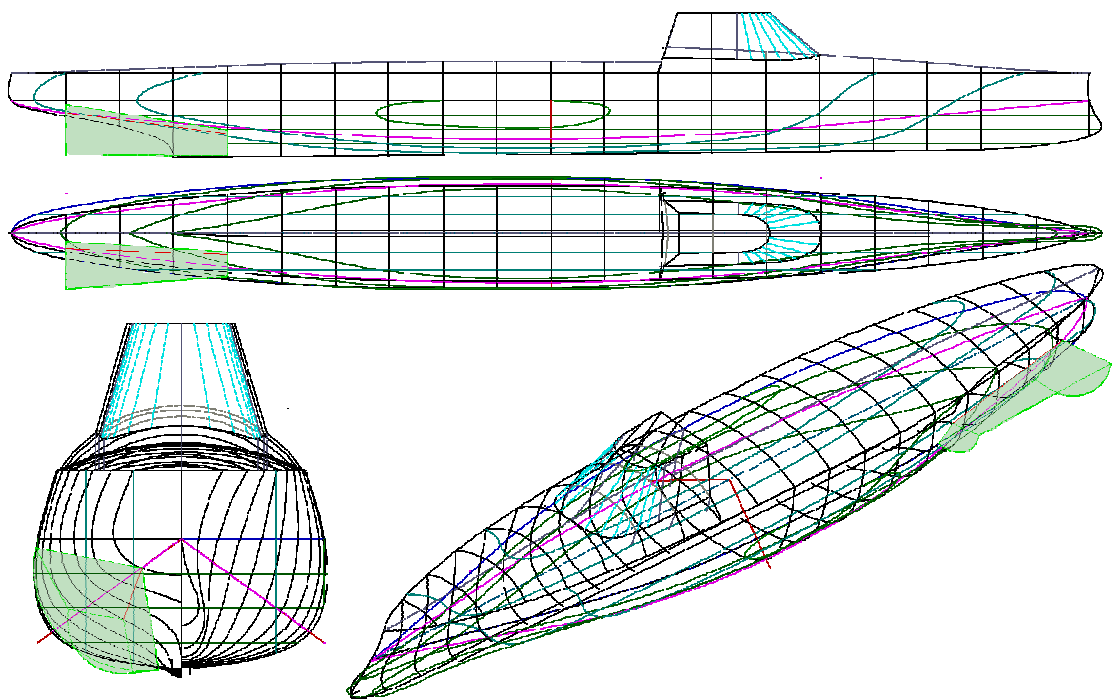
Проектируемые и испытываемые сверхмалые корабли предназначены для проведения следующих морских работ [3]:

- синхронные измерения гидрофизических параметров на акваториях портов и гаваней, в прибрежной полосе и устьях рек, в районах проведения морских работ в шельфовой зоне;
- картирование параметров состояния морских вод и построение батиметрических карт при поиске фарватеров и планировании гидротехнических работ;
- выполнение контрольных и охранных функций на подходах к базам флота при проведении поиска подвижных и заякоренных подводных объектов;
- экологическое обследование поверхности морских акваторий, получение информации об опасных морских явлениях и контроль состояния аварийных инженерных сооружений, выполнение других морских работ, участие человека в которых невозможно, опасно или нежелательно.

К настоящему времени проводятся исследования мореходных качеств и отработка программно-технических комплексов для двух вариантов автономных кораблей (рис.б):

1) телеуправляемый самоходный модуль, обеспечивающий обследование морских и портовых акваторий с непрерывной доставкой измерительной информации по радиоканалам на единый пост управления и анализа данных, размещаемого на борту сопровождающего гидрографического судна или на побережье. Водоизмещение 20 кг при полезной приборной нагрузке 5 кг, длина корпуса 1,6 м, скорость экономичного хода 3-4 узла, длительность полного хода до 8 ч;

2) сверхмалый автономный корабль, способный преодолевать расстояния до 1000 морских миль под программным управлением бортового компьютера. Самостоятельно решая определенный круг задач в удаленных морских и прибрежных акваториях, такой модуль может периодически высылать сообщения о своем техническом состоянии и передавать текущую океанографическую информацию по спутниковым каналам связи. Водоизмещение 65 кг при полезной приборной нагрузке 10 кг, длина корпуса 2,6 м, скорость хода 5-6 узлов, автономность до 300 ч.



*Рис. 6. Теоретический чертеж и аксонометрическая прорисовка формы корпуса телеуправляемого гидрофизического модуля. В палубной надстройке размещаются антенны приемника GPS и приборы контроля и управления модулем, используемые при проведении испытаний в открытом море. Под кормовой раковинной отмечена зона действия качающегося гибкого плавникового движителя.*

Относительно невысокая скорость хода таких модулей вполне согласуется с требованиями по работоспособности бортовой гидроакустической и гидрофизической измерительной аппаратуры. Успешное маневрирование автономного модуля в штормовых условиях, для изучения которых он собственно и создается, не может поддерживаться традиционным человеческим опытом по штормовому управлению судном. Своевременные решения о курсе и скорости хода должны приниматься автоматически непосредственно на борту автономного модуля с использованием специальных математических моделей, прогнозирующих динамику взаимодействия корпуса с фронтами ближайших штормовых волн (рис.1). Такие математические модели (1,2), по мере их адаптации к реальной динамике корпуса на крупном морском волнении, позволят оптимизировать условия активного хода корабля-робота, заблаговременно настраивая параметры автоматического управления исполнительными механизмами его маршевых двигателей, рулей и стабилизаторов качки.

Основу проводимых исследований составляет поиск новых математических моделей для определения динамики корабля, штормового моря, атмосферы и их взаимодействия, необходимых для оптимизации формы корпуса с позиций наилучшей мореходности. Параллельно решаются технические задачи по размещению агрегатов телемеханики, навигационного и гидрофизического измерительного оборудования; по выработке законов автоматического управления автономным модулем, в том числе в сложных и штормовых условиях плавания. Важнейшим мореходным качеством проектируемого сверхмалого корабля является сохранение вертикальности его

корпуса, что необходимо как для устойчивой работы подводных гидроакустических средств, так и для обеспечения устойчивой радиосвязи и работы средств космической радионавигации.



*Рис. 7. Испытание ходкости и оценка мореходных качеств телеуправляемого гидрофизического модуля на обрушающейся штормовой волне при ветре порядка 10-12 м/с.*

Проведенные испытания оптимизированной для плавания в условиях интенсивного морского формы корпуса гидрофизического модуля (рис.7), подтвердили правильность выбора в качестве базовых прототипов проекты быстроходных эсминцев конца XIX – начала XX веков [4,5]. Принятый к использованию теоретический чертеж корпуса, придает положительную устойчивость гидрофизическому модулю на всех углах крена, в том числе при его опрокидывании, одновременно обеспечивая возможность поддержания практически нулевой метацентрической высоты в положении корпуса на ровном киле. Округлый мидельшпангоут, острая крейсерская корма, заостренная и с очень малым надводным объемом носовая часть корпуса обеспечивают минимальное кренящее и дифференцирующее воздействие морских волн на корпус корабля, придавая ему вполне приемлемую пассивную стабилизацию на волнении. Формально это означает, что остаточную качку можно успешно компенсировать с помощью активных успокоителей, расположенных в наиболее стабильном потоке за корпусом корабля – в поле действия его движителей под кормовым подзором.

На фотографии (рис.7) гидрофизический модуль преодолевает косым курсом гребень обрушающейся волны и практически не отражает ее от своего корпуса, о чем свидетельствует неразрывность фронта штормовой волны, прошедшей через корпус движущегося надводного корабля.

Проводимые эксперименты выявили в качестве главного недостатка сверхмалых кораблей – уязвимость его движителей – гребных винтов, которые не могут разрубать водоросли, наматывают их на винты и тем самым перегружают или даже застопоривают маршевые электродвигатели. Для решения этой проблемы создан и испытан опытный образец жесткого синусоидального плавникового движителя, специально предназначенного для использования в надводном телеуправляемом гидрофизическом модуле. Для придания двумерности потока вблизи жесткого плавника, движитель был помещен между плоскими стенками, исключившими возможность перетекания жидкости через концевые кромки машущего крыла. Экспериментально подтверждена

высокая эффективность такого движителя в условиях плавания на интенсивном волнении и, отчасти, в заросших водорослями мелководных акваториях.

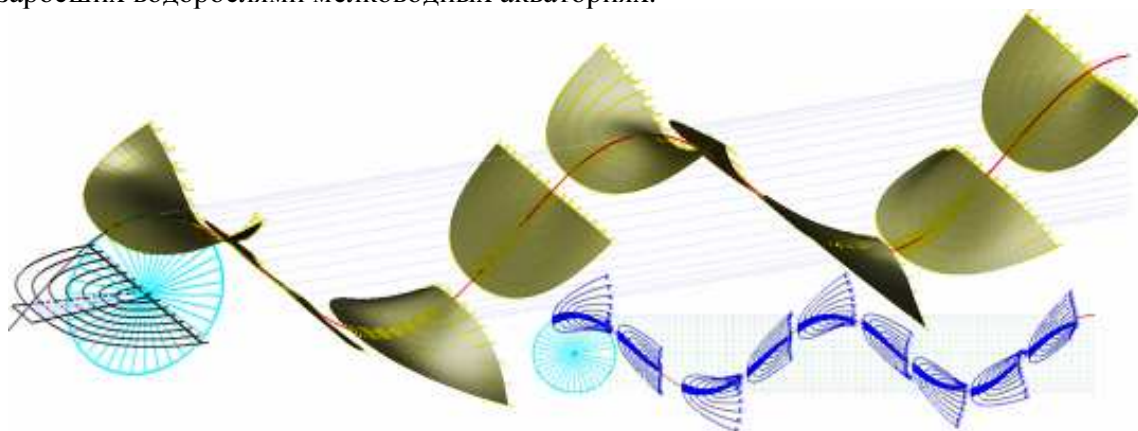


Рис. 8. Кинематическая схема маховых движений и изгибов плоскости гибкого плавникового движителя.

Полное решение проблем создания надежного движителя видится в применении гибких машущих или раскачивающихся плавников, для которых возможен внутренний контроль состояния механизмов и нагрузки на отдельных элементах изгибающейся поверхности. В настоящее время создана и проходит конструкторскую проработку новая кинематическая схема одного из вариантов такого машущего плавника (рис.8), в которой учитывается активная динамическая компенсация индуктивных вихрей, срывающихся с концевых кромок лопасти гибкого крыла за счет специального искривления плоскости его машущих движений навстречу действию пассивных гидродинамических изгибающих моментов [6].

### Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность гидрографам Сахалинского отряда гидрографических судов кап.Ш р. Тихонову И.А. кап.П р. Шешенину Д.Ю. и другим морским офицерам, принимавшим активное участие и оказавшим посильную помощь в проведении всего комплекса мореходных испытаний и в практическом опробовании создаваемой морской измерительной техники. Морские экспедиции 2006 года были проведены при поддержке компании «Сахалинская Энергия», в которой иностранные инженеры-океанографы всегда с огромным вниманием относятся к нуждам сахалинской морской науки.

### Заключение

Современная навигационная, гидрографическая и гидрометеорологическая измерительная техника претерпевает быстрое совершенствование, качественное обновление, и уже способна легко вмещаться в малые габариты морской робототехники. Ее использование предоставляет принципиально новые возможности для повышения эффективности мореходства и обеспечения безопасности штормового мореплавания; для обеспечения морских служб информацией о состоянии моря, в том числе необходимой для прогноза опасных морских явлений и оперативного гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морских работ.

В работе показаны некоторые результаты экспедиционных и теоретических исследований, основанных на анализе информации от судовых приемников GPS и высокоточных цифровых инклинометров, которые могут быть использованы совместно с математическими моделями морского волнения, адаптируя их до уровня практической применимости в составе автоматических систем управления судном в сложных и штормовых условиях плавания. Показываются также текущие наработки по использованию новой измерительной техники и вычислительных систем в составе полностью автономных сверхмалых надводных судов – роботов, предназначенных для решения широкого круга морских научных и производственных задач, в том числе в условиях недоступных для крупных судов или малых плавсредств с человеком на борту.

Современная мировая практика морских научных исследований традиционно опирается на экспедиционные работы, проводимые непосредственно в тех морских акваториях, для которых выполняется проектирование и строительство нового флота, новых морских инженерных сооружений или морской инфраструктуры. Опытно-экспериментальный и научный потенциал дальневосточной науки, наличие удобных озер и множества морских причалов, особые гидрометеорологические условия на Сахалине и Курильских островах, изобилующие ветрами и прибрежным волнением в любые сезоны года – все это может служить серьезным вкладом в будущие научные исследования актуальнейших задач освоения дальневосточных морских акваторий наиболее оптимальными и эффективными методами.

## Литература

1. С.В. Антоненко, А.Е. Малащенко, В.Н. Храмушин, Поисковые исследования штормового мореходства // Вестник ДВО РАН, № 1(113). Владивосток: Дальнаука, 2004, № 1, с.26-39.
2. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского порта. Втюрина А.С., Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шустин В.А., Шевченко Г.В. // Вестник ДВО РАН, № 1(113). Владивосток: Дальнаука, 2004, № 1, с.40-51.
3. Корытко А.С., Храмушин В.Н. Исследование путей создания сверхмалого телеуправляемого корабля // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 115-122.
4. Храмушин В.Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. 172 с.
5. Храмушин В.Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля // Вестник ДВО РАН, № 1(107). Владивосток: Дальнаука, 2003. С.50-65.
6. Vasily Khramushin. Shipbuilding Researches for a Small Autonomous Hydrophysical Vessel. // Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, June 27-28, 2006. P.35-38