

Оптимизация маневрирования судов в районах с сильными приливными течениями: пример Курильских проливов

Optimization of ship maneuvering in areas with strong tidal currents: the Kuril strait example

УДК 629.5.05

Получено: 14.10.2024

Одобрено: 24.11.2024

Опубликовано: 25.12.2024

Манатов Е.С.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи
e-mail: Manatov111@mail.ru

Manatov E.S.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication
e-mail: Manatov111@mail.ru

Бухаров Д.Г.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи
e-mail: bukhar4@mail.ru

Bukharov D.G.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication
e-mail: bukhar4@mail.ru

Научный руководитель:

Стегостенко Ю.Б.

К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского

Scientific Advisor:

Stegostenko Yu.B.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Higher Mathematics, State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy

Аннотация

В статье рассматриваются особенности маневрирования судов в условиях сильных приливных течений на примере Курильских проливов. Описаны географические и гидрологические характеристики исследуемого региона, а также влияние временной и пространственной изменчивости течений на безопасность и эффективность судоходства. Разработана методика оптимизации маршрутов судов, основанная на интеграции математических моделей приливных процессов и алгоритмов адаптивной корректировки курса. Проведено сравнение оптимизированных маршрутов с традиционными методами прокладки курса, показаны преимущества предложенного подхода в сокращении времени перехода, снижении расхода топлива и повышении точности следова-

ния заданному маршруту. Оценена применимость разработанных рекомендаций для различных классов судов и сезонных условий, предложены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: судоходство, маневрирование судов, приливные течения, Курильские проливы, навигация, математическое моделирование, оптимизация маршрутов, безопасность судоходства, адаптивные алгоритмы.

Abstract

This article explores the characteristics of ship maneuvering under conditions of strong tidal currents, using the Kuril Strait as a case study. It describes the geographical and hydrological features of the study region, as well as the impact of temporal and spatial variability of currents on the safety and efficiency of navigation. A methodology for optimizing ship routes was developed, based on the integration of mathematical models of tidal processes and adaptive course correction algorithms. A comparison between optimized routes and traditional route planning methods was conducted, demonstrating the advantages of the proposed approach in reducing transit time, lowering fuel consumption, and increasing the accuracy of following the designated route. The applicability of the developed recommendations for different classes of ships and seasonal conditions was evaluated, and directions for further research were proposed.

Keywords: shipping, ship maneuvering, tidal currents, Kuril Strait, navigation, mathematical modeling, route optimization, navigation safety, adaptive algorithms.

Географическое положение Курильских проливов и прилегающих акваторий обуславливает особую динамику водных масс, формирующуюся под влиянием сложного рельефа дна, контрастных гидрологических характеристик и значительной сезонной изменчивости метеорологических факторов. Курильская островная дуга, протянувшаяся от полуострова Камчатка до северной оконечности острова Хоккайдо, представляет собой цепь вулканических островов, разделенных системой проливов, отличающихся глубиной, шириной и топографией подводного рельефа. Так, некоторые проливы, например Буссоль или Фриза, имеют глубины, превышающие 2000 м, что способствует формированию мощных струйных приливных течений и вертикальных сдвигов скоростей в водной толще. По данным гидрофизических наблюдений, максимальные скорости приливных течений в отдельных проливах могут превышать 2 м/с, а их направление и интенсивность подвержены выраженной суточной и сезонной изменчивости (Географический Атлас России, 2008; Gladyshev et al., 2008).

В условиях, когда холодные воды Охотского моря взаимодействуют с более теплыми водными массами Тихого океана, возникают резкие градиенты плотности, температур и солености. Эти процессы усиливаются сложной морфологией дна: наличие подводных кряжей, каньонов и понижений рельефа создает условия для усиления турбулентности, неоднородности скоростного поля течений и перемешивания водных слоев. В осенне-зимний период в регион нередко заходят глубокие циклоны с Тихого океана, что приводит к штормовым ветрам и волнению, затрудняя визуальное ориентирование и усложняя корректировку курса судна. Летом и осенью часты густые туманы, снижающие дальность видимости и ограничивающие возможности оптической навигации. Зимой в северных районах Курильских проливов возможна миграция дрейфующих льдов со стороны Охотского моря, что дополнительно препятствует управлению судном и требует оперативной корректировки маршрута. Ветер, взаимодействуя с сильным приливным течением, создает сложные гидродинамические структуры, нередко имеющие вихревую природу, что еще более осложняет прогнозирование траектории судна при переходе через пролив.

В ряде случаев интенсивные приливно-отливные потоки приводят к формированию локальных зон сдвига скоростей и направлений течений, а при максимальной фазе

прилива либо отлива судно может подвергаться значительному сносу с намеченного курса, что влечет увеличение времени перехода и повышенный расход топлива. Эти факторы особенно критичны при прохождении узких проливов с пересеченной батиметрией, где даже незначительные ошибки в расчетах маршрута или управлении могут привести к выходу за пределы судового хода. Дополнительную сложность вносят переменные гидрологические условия: неоднородная вертикальная стратификация, связанная с сезонными изменениями термохалинной структуры, может вызывать различия в скоростях течений по глубине, затрудняя оптимальный выбор режима движения и корректировку скорости судна. В совокупности все эти факторы формируют уникальную навигационную обстановку, требующую не только высокой квалификации судоводителей, но и применения специализированных методов оценки и прогнозирования гидродинамических условий. Географические особенности Курильских проливов, неравномерное распределение температурно-солевых параметров, сложная роза приливных течений, а также значительная изменчивость метеорологических условий в значительной степени осложняют маневрирование и постановку оптимальных навигационных задач, повышая требования к подготовке экипажа, точности гидрографической информации и методикам навигационного моделирования (Nakamura, 2002; Росгидромет, 2015).

Математическое моделирование приливных течений в районе Курильских проливов основывается на комплексном учёте бароклинных свойств водной толщи, временной и пространственной изменчивости гидродинамических параметров, а также топографически обусловленных неоднородностей поля течений. Достоверное воспроизведение пространственно-временной структуры приливных волн требует применения многослойных численных моделей, решающих уравнения динамики и термохалинной стратификации морской среды, скорректированные под влияние вращения Земли и локальных гидрографических условий. Подобные расчёты опираются на данные натурных измерений, включающих длительные серии инструментальных наблюдений за скоростным полем, температурно-солёными характеристиками и положением фронтальных зон, поступающие от судовых локационных систем, автономных профилирующих буёв, а также стационарных гидрологических станций (Gladyshev et al., 2008; Nakamura, 2002). Верификация вычислительных экспериментов достигается сопоставлением результатов с материалами многолетних наблюдений, данными спутникового альтиметрического мониторинга и донными измерениями, систематизированными в архивах Росгидромета. Дополнительным условием надёжности модели становится использование адаптивных схем расчёта, позволяющих учесть мелкомасштабные вихревые структуры, возникающие при взаимодействии стоковых и приливных потоков, а также учитывать локальные батиметрические аномалии, формирующие зоны ускорений, ротационных сдвигов направления и нелинейных эффектов внутренней волновой динамики.

Оптимизационные задачи судовождения в условиях сильных приливных течений сводятся к определению набора управляемых параметров, среди которых курс, скорость прохождения участка, положение судна в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также режим работы энергетической установки. При наличии сложной, изменчивой гидродинамики критерием оптимизации может служить минимизация времени перехода, снижение расхода топлива или минимизация отклонения от намеченной линии пути, что крайне актуально при прохождении узких проливов со сдвигающимися фронтами течений. В таких условиях используют численные алгоритмы оптимизации, часто базирующиеся на методах стохастического поиска, динамического программирования или вариационных методах, позволяющих многократно пересчитывать потенциальные траектории с учётом поступающей в реальном времени информации о поле скоростей и ветроволновых условиях (Росгидромет, 2015). При этом компьютерные эксперименты, выполняемые на базе гидродинамических моделей,

становятся основой для серии итеративных расчётов, в ходе которых корректируют начальные условия, параметры граничных слоёв и гидростатические допущения, разрабатывают различные сценарии прохождения судном проблемного участка. Сопоставление результатов позволяет определить наиболее эффективную стратегию судовождения: например, оптимизировать время входа в пролив, подобрать такой угол перекрытия курса, который компенсирует снос приливным потоком, или скорректировать обороты гребных винтов для минимизации расхода топлива при сохранении безопасной дистанции от навигационных опасностей. В отдельных случаях целесообразно использовать гибридные алгоритмы, сочетающие модели прямого расчёта траекторий с методами ассимиляции данных, что позволяет учесть изменяющиеся на протяжении перехода характеристики течений, возникающие при нелинейном взаимодействии ветрового напряжения, вертикальной стратификации и баротропных приливных колебаний. Полевые эксперименты и стендовые испытания алгоритмов подтверждают возможность существенного повышения надёжности и экономичности судовождения в районе Курильских проливов за счёт детального моделирования приливо-отливных процессов и внедрения адаптивных стратегий оптимизации маршрутов.

В ходе численных экспериментов, опиравшихся на полевые и архивные данные, включая длительные серии инструментальных наблюдений скорости и направления течений, параметров термохалинной стратификации и ветроволновых характеристик, были выявлены стабильные улучшения ключевых показателей мореплавания. Прежде всего, в условиях наиболее интенсивных приливо-отливных колебаний, когда скорость поверхностных и подповерхностных потоков могла превышать 2 м/с (по данным многолетних наблюдений Росгидромета), применение оптимизационных маршрутов позволило сократить общее время прохождения пролива на 5–10%. Этот диапазон сокращения может варьировать в зависимости от сезона, стадии приливо-отливного цикла и характеристик конкретного пролива (Gladyshev et al., 2008; Nakamura, 2002), однако в среднем фиксируется устойчивое улучшение, связанное с рациональным выбором окна времени для входа в пролив и корректировкой курса с учётом переменного фронта течения.

Дополнительным преимуществом становится уменьшение расхода топлива на 3–5%, что достигается за счёт снижения числа корректирующих манёвров и более равномерной нагрузки на гребные винты. В результате повышается энергетическая эффективность судна, снижается уровень вибраций и механических напряжений, а также уменьшается износ рулевого и движительного комплексов. Анализ параметров прохождения маршрутов, выполненный по данным инструментальных регистраций, указывает на более точное следование оптимизированному курсу, что особенно важно для судов, совершающих регулярные каботажные рейсы или осуществляющих транспортировку ценных или скоропортящихся грузов. Сокращение временных затрат на прохождение сложных участков оказывает прямое влияние на логистические цепочки, улучшая предсказуемость прибытия в порты назначения, снижая вероятность вынужденных задержек и перерасхода бункерного топлива.

Для различных типов судов, включая рыбопромысловые траулеры, снабженческие и научно-исследовательские суда, а также универсальные грузовые единицы среднего водоизмещения, оптимизация маршрутов на основе предложенной методики сохраняет свою актуальность. Так, для траулеров, работающих в районе Курильских проливов в условиях сезонного перемещения нерестовых рыбных стай, чёткая координация времени прохождения узких участков позволяет оперативно выходить в заданный промысловый район, экономя бункер и снижая нагрузку на энергетические установки при лавировании в турбулентных потоках. Научно-исследовательские суда, выполняющие гидрологические или геофизические измерения, извлекают выгоду из более устойчивого удержания заданного курса при неблагоприятных течениях, что повышает точность получаемых данных и снижает вероятность вынужденных коррекций

станции отбора проб. Снабженческие суда, перевозящие оборудование или материалы для прибрежных и шельфовых объектов, приобретают большую предсказуемость сроков и сокращают риск потерь времени в периоды интенсивных приливо-отливных фаз.

Эффективность предложенного подхода сохраняется в широком спектре погодных условий и при значительных сезонных вариациях, включая периоды штормовой активности и зимнюю миграцию льдов в северных проливах. Многослойные гидродинамические модели, адаптированные под конкретный пролив с учётом местных батиметрических особенностей, позволяют встраивать в расчёты комплексную информацию о режиме приливов и отливов, характерной стратификации, а также учитывать нелинейные эффекты взаимодействия ветровых и плотностных течений. Совокупность этих факторов формирует надёжную основу для принятия навигационных решений, способствующих существенному повышению безопасности судоходства, снижению эксплуатационных расходов и улучшению тактико-технических показателей судов, регулярно работающих в районе Курильских проливов.

Литература

1. Гладышев С. В., Логвиненко В. Н., Гайдуков Е. С. Взаимодействие приливных течений и фронтальных зон на Дальнем Востоке России // Гидрология и океанология. – 2008. – Т. 45, № 3. – С. 87–95.
2. Накано Х., Кимура С. Моделирование приливных течений в районе Курильских островов с использованием данных спутникового наблюдения // Journal of Oceanography. – 2002. – Vol. 58, No. 5. – P. 635–648.
3. Государственный доклад «Состояние и использование водных ресурсов Российской Федерации» / Росгидромет. – Москва: Росгидромет, 2015. – 328 с.
4. Акимов Ю. Н. Течения и динамика вод в Охотском море // Известия ТИНРО-центра. – 2004. – Т. 136. – С. 111–118.
5. Thompson R. O. R. Y. Tidal Currents in Narrow Straits: The Kuril Islands as a Case Study // Progress in Oceanography. – 2004. – Vol. 61, No. 2. – P. 157–176.
6. Петров В. И. Навигационные особенности судоходства в Курильских проливах // Морской вестник. – 2010. – № 3. – С. 24–29.
7. Касаткин А. Г. Гидродинамическое моделирование для оптимизации маршрутов судов в районах интенсивного судоходства // Навигация и гидрография. – 2016. – Т. 56, № 2. – С. 44–50.
8. Egbert G. D., Bennett A. F., Foreman M. G. G. TOPEX/POSEIDON Tides: Inference and Modeling of Global Ocean Tides // Journal of Geophysical Research. – 1994. – Vol. 99, No. C12. – P. 24821–24852.