



Внутренние волны – механизмы их проявления на оптических и радиолокационных изображениях¹

Булатов В.В. *, Медведева А.В. **, Станичный С.В. **

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

**Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь

Движения в поверхностном слое океана, вызываемые прохождением внутренней волны, вызывают возмущения в характеристиках границы раздела океан-атмосфера и стратификации верхнего слоя. Внутренняя волна формирует чередующиеся конвергентные и дивергентные зоны, параллельные фронту волны, и собственно изменяет глубину верхнего слоя. Именно эти два фактора влияют на параметры среды, формирующие сигналы датчиков дистанционного зондирования оптических сканеров и радиолокаторов. Ниже приведен обзор особенностей проявления внутренних волн на спутниковых оптических изображениях высокого пространственного разрешения (MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8) и на радиолокационных снимках (C-SAR Sentinel-1).

Радиолокационные изображения

На радиолокационных изображениях поверхностное проявление внутренних волн определяется изменением шероховатости морской поверхности в конвергентно-дивергентных зонах. Выделяются два механизма модуляции – гидродинамический и сликовый [1]. Гидродинамическая модуляция поверхности при прохождении пакета внутренних волн вызывает увеличение шероховатости морской поверхности в зонах конвергенции и соответственно увеличение рассеянного излучения. Обычно случаи гидродинамического проявления

внутренних волн обнаруживаются на фоне низких или умеренных скоростей ветра (примерно от 2–3 до 7–8 м/с).

Сликовый механизм также связан с формированием внутренними волнами системы конвергентно-дивергентных течений и модуляции пленок (сликов) природного или антропогенного происхождения. При прохождении пакета внутренних волн наблюдается противоположные гидродинамическому механизму эффекты: слики, концентрируясь в зонах конвергенции, выглаживают поверхность и способствуют ослаблению обратного рассеяния. Случаи проявления сликового механизма регистрируются обычно на фоне ветров со скоростями до 2–3 м/с.

Оптические изображения

На оптических спутниковых изображениях механизмы проявления внутренних волн определяются не только изменением шероховатости морской поверхности и отраженного солнечного излу-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-21-00194 «Аналитические методы математического моделирования волновой динамики неоднородных гидрофизических сред».



Рис. 1. Пример инверсии оптического контраста при прохождении пакета внутренних волн из Гибралтарского пролива в Средиземное море; объединенные сцены MSI Sentinel-2 от 21 июня 2017 г.

чения, но также возможным изменением восходящего из водной толщи излучения, формируемого в верхнем слое, толщина которого изменяется при прохождении внутренней волны.

Гидродинамическая модуляция поверхности. Наиболее распространенные случаи поверхностного проявления внутренних волн, регистрация осуществляется за счет отраженного излучения и аналогична регистрации радиолокационными сенсорами. Конвергентные (с большей шероховатостью) зоны в оптическом диапазоне в зависимости от взаимной геометрии Солнца и датчика могут быть как более темными, так и более светлыми. В зоне близкой к прямому зеркальному солнечному излучению увеличение шероховатости может вызывать уменьшение принимаемого датчиком сигнала, а на периферии солнечного блика, наоборот, увеличение. В промежуточной зоне может наблюдаться инверсия оптического контраста (Рис. 1), — то есть, из-за геометрических характеристик пакета для зон конвергенции и дивергенции значения яркости восходящего излучения, что в одной части фронта, могут быть противоположными в другой части, а в зоне перехода сравниться.

Сликовая модуляция поверхности. Проявление базируется на том же принципе, что и при фиксации радиолокационными сенсорами, пленками могут являться нефтепродукты, масла, пленки биологического происхождения и иные ПАВы. Взаимодействие внутренних волн и пленок регистрируется достаточно редко, на возможность обнаружения влияют характеристики приводного ветра (проявление при ветрах со скоростями примерно до 2–3 м/с) и взаимное расположение Солнца и спут-

ника (проявление при различии в интенсивности сигналов отраженного излучения, поступающих от пленок и окружающих вод в оптический сенсор). Прохождение пакета внутренних волн создает два варианта взаимодействия с пленочными структурами. Первый вариант заключается в том, что пленки концентрируются в зонах конвергенции и отсутствуют в зонах дивергенции — характерно для оптически «тонких» пленок (изменяющих только шероховатость поверхности). Второй вариант связан с оптически «толстыми» пленками — теми, что помимо шероховатости поверхности изменяют и коэффициент отражения поверхности: при прохождении пакета внутренних волн пленки выявляются в зонах конвергенции и дивергенции, но под действием орбитальных течений варьирует их оптическая толщина.

Модуляция глубины рассеивающего слоя. Комбинирование оптических каналов позволяет минимизировать или устранить полностью отраженное излучение и выделить восходящую из-под воды рассеянную компоненту сигнала. В рассеянном излучении обнаруживаются внутренние волны, изменяющие толщину мутного слоя: она меньше над гребнями пакета внутренних волн (достигающими или не достигающими поверхности) и больше — над подошвами. Внутренние волны с таким типом проявления обнаруживаются в районах с высоким содержанием гидрозолей (взвешенное вещество, фитопланктон) — преимущественно в зонах речных плюмов или в прибрежных зонах.

Модуляция объектов в поверхностном слое и на поверхности. Аналогично сликовому механизму концентрации пленок в конвергентных зонах, могут скапливаться и другие плавающие субстанции. Такими объектами могут быть: различный мусор, пыльца растений, икра рыб, слоевища Саргассовых водорослей, цианобактерии, морская слизь и др. Для этих формирований характерна концентрация в зонах конвергенции при прохождении пакета внутренних волн, и на оптических изображениях выделяются квазипараллельные полосы с повышенной яркостью восходящего излучения с максимумом излучения на различных участках видимого диапазона (что зависит от оптических свойств объектов).

Модуляция плавающих тающих, раздробленных льдов. Льды также относятся к плавающим объектам, и их изменение при прохождении внутренних волн имеет сходство с влиянием на иные плавающие объекты. Но проявление пакета внутренних волн на оптических и радиолокационных изображениях зависит от характеристик льда. Так, немногочисленные разрозненные льдины концентриру-

ются в зонах конвергенции в зависимости от размера: большему влиянию орбитальных течений подвержены льдины малых размеров (до десятков метров), меньшему — более крупные (от сотен метров). В тех случаях, когда регистрируются начальные виды льда или тающий однолетний лед, проявление внутренних волн зависит от толщины льда: они могут представлять собой чередование зон преимущественно льда (зоны конвергенции) и преимущественно водной поверхности (зоны дивергенции) при прохождении через поле льда с малой толщиной, и могут выделяться за счет чередования льдов большей и меньшей концентрации. Во втором случае в зонах конвергенции отражение сигнала происходит ото льда, а в зонах дивергенции — от смеси льда и воды. Кроме того, регистрируются случаи, когда прохождение пакета внутренних волн меняет характеристики льда — трансформирует его в менее плотный по ширине фронта.

Модуляция обрушений поверхностных волн. Здесь работает гидродинамический механизм, вызывающий увеличение обрушений и площади покрытой пеной в зонах конвергенции. Как правило, такого рода явления наблюдаются при ветрах умеренных или высоких скоростей (от 5–8 м/с и выше) [2]. Обычно такой механизм реализуется для интенсивных внутренних волн — примером таких могут служить внутренние волны, распространяемые из Гибралтарского пролива в Средиземное море. Они генерируются под действием полусуточных приливов из-за сложного рельефа дна на входе в Гибралтарский пролив.

Список литературы

- [1] *Robinson I. S.* Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography. Springer Science and Business Media, 2004
- [2] *Kubryakov A. A., Kudryavtsev V. N., Stanichny S. V.* Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 253. p. 112–144.