

## ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ОЗЕРАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОЗЕРНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

*Е.А. Рувинская, А.М. Кузин, М.Н. Баренбойм,  
О.Е. Куркина, А.А. Куркин*

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Задача сохранения озерных экосистем в последние годы стала одной из приоритетных в вопросах сохранения окружающей среды. Необходимость охраны, мониторинга и прогнозирования экологической ситуации в озерах связана с тем, что эти водные угодья служат местом обитания многих животных и выполняют важнейшие функции регулирования гидрологического режима и климата обширных территорий.

При этом для получения более полных и качественных сведений о состоянии озера необходимо учитывать то, что качество воды и экология большинства таких водоемов напрямую зависит от горизонтального переноса и вертикального перемешивания примесей, питательных веществ, кислорода и других биологических агентов. Причем все эти процессы индуцированы в первую очередь внутренними волнами, рождающимися в любом природном водоеме. Рассмотрим более подробно особенности волновой динамики в озерах.

Поток энергии в замкнутые водоемы обеспечивается, главным образом, за счет ветрового воздействия. Оно инициирует сгонно-нагонные явления, отклоняя поверхность водоема и термоклин от горизонтального уровня. В бассейнах малых и средних размеров (для которых можно пренебречь влиянием вращения Земли) откликом на такое воздействие после прекращения ветра становится низкочастотная стоячая волна с длиной, равной размерам водоема – сейша, в поле как поверхностных, так и внутренних волн. Натурные наблюдения, однако, показывают, что поле внутренних гравитационных волн в закрытых бассейнах имеет непрерывный спектр частот – от низких, соответствующих сейшам, до высоких, достигающих частоты плавучести. Реальные записи внутренних волн в озерах часто представляют собой цуги интенсивных короткопериодных импульсов, или пакеты внутренних солитонов, сформировавшиеся в результате нелинейной эволюции синусоидальных низкочастотных волн малой амплитуды, что иллюстрирует передачу энергии от больших масштабов – малым. Возможные механизмы такого перераспределения энергии от волн в масштабах всего бассейна в относительно короткие волны и даже в турбулентные состояния включают: 1) нелинейное укрупнение; 2) сдвиговую неустойчивость; 3) распространение в сторону мелководья и отражение от наклонных границ; 4) взаимодей-

ствие с топографией и рассеяние на интрузиях плотности. Эти механизмы были изучены в теоретических, лабораторных и численных работах.

Механизм генерации крупномасштабных колебаний уровня изучен достаточно давно и подробно, в то же время сравнительно мало внимания уделялось тому, как энергия передается по спектру от длинных волн к более коротким. Такая ситуация объясняется тем, что гидродинамические модели, используемые в лимнологии, в своем большинстве не могут корректно воспроизводить каскад передачи энергии от сейшевых колебаний к сильнонелинейным уединенным возмущениям и возникающее при их трансформации на мелководье перемешивание водных слоев (это, как правило, связано с приближением гидростатики, особенностями стратификации пресноводных водоемов, недостаточным временным и/или пространственным разрешением моделей). Подводя итоги, нужно сказать, что специфика волновых процессов в озерах требует уточнения и применения адекватных современных математических моделей, учитывающих особенности стратификации, рельефа дна, нелинейность, дисперсию и диссипацию волн.

В нашем распоряжении имеется программный комплекс, позволяющий численно решать полную систему уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости, который был использован нами для моделирования динамики внутренних волн в замкнутых водоемах с температурной стратификацией. В ходе настоящей работы нами был проведен ряд численных экспериментов для озер с обезразмеренными характеристиками, а именно: варьировалась относительная глубина залегания термоклина и относительная амплитуда отклонения термоклина. Результаты экспериментов были проанализированы с точки зрения волновой динамики, обобщены и могут быть применены для оценок характеристик внутренних волн в любом природном озере, если известны его параметры, такие как глубина водоема, распределение температур внутри озера и параметры ветрового режима.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – докторов наук (МД-99.2010.5), и РФФИ 10-05-00199а.