

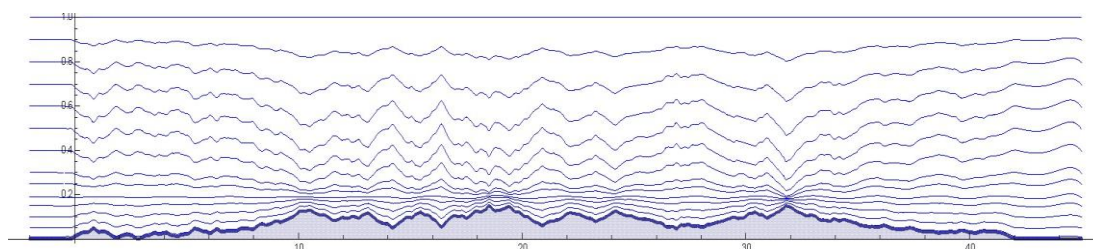
Интерференция внутренних волн в стратифицированных течениях над сложной топографией

- Макаренко Николай Иванович, зав. каф. гидродинамики ММФ НГУ, д.ф.-м.н.
- Мальцева Жанна Львовна, доц. каф. ВМ ММФ НГУ, к.ф.-м.н.;
- Черевко Александр Александрович, доц. каф. ВМ ММФ НГУ, к.ф.-м.н.;
- Денисенко Данила Сергеевич, Галичкина Мария Александровна – студенты ММФ НГУ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 2.1.1.4918 “Математические проблемы динамики сильно неоднородных сред”, рук. П.И.Плотников, 2010 – 2011) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-01-00671 “Влияние дисперсии и перемешивания на структуру течений в окрестности препятствий: математическое и лабораторное моделирование”, рук. Н.И.Макаренко, 2012 – 2014; грант 15-01-03942 “Гидродинамика глубоководных и присклонных течений”, рук. Н.И.Макаренко, 2015 – 2017)

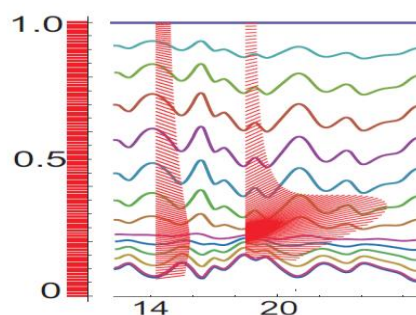
Волновые структуры, формирующиеся в неоднородных по плотности течениях над возвышениями неровного дна, носят название подветренных волн (lee waves). В природных условиях такие волны возникают в потоках воздуха над холмистым или горным рельефом местности. Обычно они образуются с подветренной стороны орографических препятствий в виде групп волн с длинами до нескольких километров и амплитудами в сотни метров. Такие волны являются одним из основных факторов возникновения воздушных ям и локальных зон турбулентности (роторов) с резкими перепадами скоростей потока, что небезопасно для полетов воздушных транспортных средств. В океанических условиях похожие волновые конфигурации нередко возникают в придонных течениях над подводными хребтами. Они играют важную роль в процессах теплообмена, поскольку обрушение внутренних волн приводит к резкой интенсификации перемешивания морской воды. В метеорологии и океанологии в последние годы заметно усилился интерес к малоисследованному вопросу о структуре волновых полей, возникающих при взаимодействии потока с комбинированными препятствиями типа горных цепей. Имеющиеся результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о высокой чувствительности волновых следов над последовательностью препятствий к их геометрической форме, взаимному расположению и параметрам набегающего потока. Математическое моделирование, выполненное в сочетании с серийными расчетами на кластере ИВЦ, имело своей целью выявление ключевых закономерностей для данного класса гидродинамических явлений. Основным предметом изучения в отчетном периоде было свойство фрагментации волновых полей, обусловленное волновой анизотропией расслоенной среды и интерференцией подветренных волн над сложной топографией.

Математическая модель стратифицированных течений, подверженных действию силы тяжести, использует нелинейные уравнения динамики неоднородной несжимаемой жидкости. Задача о внутренних стационарных волнах в двумерных течениях сводится к построению решений уравнения Дюбрей-Жакотэн – Лонга в неограниченной области типа криволинейной полосы с надлежащими условиями излучения вверх и вниз по потоку. По своей постановке это нелинейная задача дифракции, в которой основными внешними параметрами являются скорость набегающего потока и характерная частота плавучести в нем, а также типичная высота и крутизна отдельных возвышений в цепи препятствий.



Для стратифицированного течения над сложной топографией дна характерно формирование зон концентрации энергии потока под действием дисперсии и интерференции нелинейных внутренних волн

Математическая модель слоистого течения адекватно описывает формирование затопленных струй, локализованных над наиболее высокими препятствиями в горной цепи



В результате выполнения НИР развита эффективная полуаналитическая методика нахождения зон концентрации волновой энергии в течении при известных параметрах внешнего потока и геометрии препятствий. Данный подход использует метод нормальных мод (версия метода Фурье) в сочетании с методом возмущений по параметру, характеризующему высоту препятствий. Свойство фрагментации волнового поля в стратифицированном течении над сложным рельефом объясняется в этих терминах как результат доминирования (или подчинения) гидростатической моды по отношению к волновым модам в придонном слое и вышерасположенных областях течения. Математически строго доказана сходимость рядов возмущений по параметру высоты препятствий, что дает теоретическое обоснование алгоритма расчета.

Программная реализация была выполнена в пакете Wolfram Mathematica, хорошо совместимом с аналитической частью алгоритма. Численная реализация использовала двухступенчатую процедуру с привлечением пилотной модели первого приближения для предварительного обнаружения и локализации областей интерференции с последующим применением модели более высокого асимптотического порядка точности для учета нелинейных поправок. Использование кластера ИВЦ НГУ на этапах расчета, требующих больших вычислительных ресурсов, открыло принципиальную возможность для конструктивного решения задачи об интерференции нелинейных волн над сложными препятствиями. Были проведены серии численных экспериментов, которые показали эффективность предложенного метода нахождения “горячих” зон волновой интерференции. Разработанный метод адекватно воспроизводит наблюдаемые качественные свойства потока и дает ожидаемые количественные характеристики в зонах обострения течения с параметрами стратификации, соответствующими натурным условиям.

Список основных публикаций

- [1] Denisenko D.S., Makarenko N.I. Supercritical stratified flow over an uneven bottom // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V.894. 012025 (Scopus) IOP Publishing, doi: 10.1088/1742-6596/894/1/012025.
- [2] Makarenko N.I., Maltseva J.L., Cherevko A.A. Stratified flows over a complex relief// Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 722. P. 012027 (Scopus) IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/722/1/012027.
- [3] Ляпидевский В.Ю., Макаренко Н.И., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю. Гидродинамика течений в глубоководных каньонах // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. 2015. Т.157, кн. 3. С. 64 – 71.
- [4] Makarenko N., Maltseva J., Cherevko A. Structures of lee waves over combined topography // 20th Int. Symp. Nonlinear Acoustics, Lyon, France, June 29 – July 3, 2015/ AIP Conf. Proc. V.1685. 090005. Melville, New York, 2015. doi:10.1063/1.4934471 (Scopus).
- [5] Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л. Стационарные волны в стратифицированном течении над комбинированным препятствием//Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т.55, №2. С. 141 – 147.

- [6] Makarenko N.I., Maltseva J.L. Nonlinear lee waves over combined obstacles // Int. Conf. Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodes, Greece, 21 – 27 Sept. 2013 / AIP Conf. Proc. V.1558. P.408 – 410. Melville, New York, 2013 (Scopus).
- [7] Makarenko N.I., Maltseva J.L. Interference patterns in non-homogeneous flow over the obstacles // 19th Int. Symp. Nonlinear Acoustics, Tokyo, Japan, 21 – 24 May 2012. /AIP Conf. Proc. Vol. 1474. P. 323 – 326. Melville, New York, 2012 (Scopus).
- [8] Makarenko N., Maltseva J. Interference of lee waves over mountain ranges // Natural Hazards Earth System Sciences. 2011. V.11. P. 27-32. doi:10.5194/nhess-11-27-2011
Импакт-фактор (WoS/JCR): 1.329.

Тезисы докладов

- [9] Makarenko N., Maltseva J. Fragmented structures of lee waves over combined obstacles// Geophysical Research Abstracts. 2015. Vol. 17. EGU2015-3383, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 12 – 17 April 2015.
- [10] Makarenko N.I., Maltseva J.L. Non-linear internal waves over rough topography // Geophysical Research Abstracts. 2013. Vol. 15. EGU2013-6676 / EGU General Assembly. Vienna, Austria, 22 – 27 April, 2013.