



УДК 551.553.8:681.3(571.5)

## **Исследование штормовых ветров над озером Байкал с использованием негидростатической численной модели WRF (Weather Research and Forecasting)**

П. А. Найденов ([pavelnaidenov@geogr.isu.ru](mailto:pavelnaidenov@geogr.isu.ru))  
Лхамжавын Жамбажамц ([jambajamts@num.edu.mn](mailto:jambajamts@num.edu.mn))

**Аннотация.** Представлены результаты исследований штормов различных направлений над оз. Байкал за период с 1959 по 1971 г. Использовалась третья версия программы моделирования метеорологических процессов WRF (Weather Research and Forecasting). Результаты были сопоставлены с метеорологическими данными наблюдений. Сделаны выводы о возможности прогнозирования штормовых ветров.

**Ключевые слова:** оз. Байкал, численная модель, поле ветра, моделирование штормов.

### **Введение**

Озеро Байкал вовлечено в круг больших проблем освоения природных богатств Сибири. Проблема рационального использования природных комплексов Байкала и его бассейна выдвигает вопросы неотложного и разностороннего изучения природных особенностей этого региона, и потому возникает необходимость глубокого всестороннего исследования его ветрового режима.

Ветровые условия над оз. Байкал отличаются сложностью и многообразием. Сложный рельеф высоких горных хребтов, обрамляющих Байкал, само расположение огромной массы воды на материке с резко континентальным климатом, вытянутость котловины озера в меридиональном направлении более чем на 600 км способствуют возникновению над озером местных воздушных циркуляций.

Исследование и прогноз штормов (скорость  $> 20$  м/с) на Байкале представляет наибольший практический интерес, поскольку сила, направление и продолжительность ветра относятся к числу основных факторов, определяющих волнение на акватории озера. Возможность оперативного, качественного и заблаговременного прогноза ветра в значительной степени способствует планированию и проведению различных работ, осуществляемых на озере (плавание судов, проводка плотов и рыбный промысел), а также при научных исследованиях течений, переформирования берегов, влияния промышленных сточных вод на загрязнение озера и пр.

В настоящей работе изложены результаты количественной оценки достоверности воспроизведения полей ветра нескольких наиболее жестоких

штормов на Байкале на основе негидростатической модели WRF (Weather Research and Forecasting) [5; 6], которая является доступной для общего пользования и применяется как в исследовательских, так и в прогностических целях.

### **Цель и задачи**

Основной целью данной работы является количественное сравнение результатов моделирования с использованием модели WRF случаев жесточких штормов над акваторией Байкала с картами полей ветра, представленными в [1], и выявление возможности их прогнозирования.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. Провести предварительные численные эксперименты с целью установления оптимального горизонтального разрешения области моделирования.
2. Провести модельные расчеты и получить численные данные компонент вектора скорости ветра по оси абсцисс ( $u$ ) и ординат ( $v$ ) с помощью модели WRF для следующих дат: 11–12/X 1959 г., 4/XI 1959 г., 7–8/X 1965 г., 6/VIII 1967 г. и 28–29/IX 1969 г.
3. Полученные данные сравнить с полями ветра, представленными в [1].
4. Построить карты абсолютных отклонений модулей скорости и направлений ветра.
5. Провести оценку прогностической возможности модели.

### **Метод исследования**

В нашем исследовании мы использовали программу моделирования WRF, которая основана на системе уравнений гидротермодинамики, записанных в  $\sigma$ -системе координат. В модели применяется параметризация процессов подсеточного масштаба: конвекции в кучевых облаках, крупномасштабной конденсации, микрофизических процессов. Кроме того, в модели применяется параметризация радиации, планетарного пограничного слоя, процессов на подстилающей поверхности.

В WRF используются картографические проекции земной поверхности: стереографическая полярная, ламбертовская конформная и меркаторовская. В нашем исследовании мы применяли проекцию Ламберта, так как она наилучшим образом подходит для средних широт. Кроме того, проекция Ламберта также используется в [1], что упрощает сравнение полей ветра.

При инициализации модели (задании начального приближения для метеорологических параметров) и определении граничных условий для области моделирования использовались данные окончательного анализа Национального центра океанических и атмосферных исследований США с горизонтальным разрешением  $2,5^\circ$  и периодичностью 6 ч (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>).

Детальное описание WRF можно найти в работе Скамароха и др. [5], а также в руководстве по WRF [6].

Как и для использования других метеорологических программ моделирования, WRF требуются компьютеры с вычислительной мощностью, соответствующей поставленной задаче. В таблице приведены результаты сопутствующего эксперимента по вычислению времени, затрачиваемого на расчеты на различных компьютерах при одинаковых условиях моделирования.

*Таблица*

Время, затраченное на реализацию расчетов программой WRF в зависимости от оборудования (размер сетки –  $85 \times 101 \times 18$  точек, горизонтальное разрешение –  $5 \times 5$  км, верхняя граница на изобарическом уровне 500 гПа, срок моделирования – 1 сут.)

Процессор	Тактовая частота ядра (гигагерц)	Количество ядер процессора	Объем оперативной памяти (гигабайт)	Время (ч:мин)
Intel Core I7 3960x	3,3	12	8	0:11
AMD FX9590	4,8	8	16	0:17
Intel Core I3 3220	3,3	4	8	0:25
Intel Core I3 2100	3,1	4	2	0:35
Intel Core 2 Quad 9300	2,4	4	4	0:49
Intel Pentium E5300	2,6	2	2	1:19
AMD Athlon 4800+	2,5	2	2	1:48
Intel Celeron	2,66	1	1	4:30

Следует обратить внимание, что при расчетах на многоядерных процессорах необходимо использование программы WRF, скомпилированной для многоядерных систем. Если не использовать библиотеку Open Multi-Processing, то даже самый мощный и дорогой из представленных процессоров (I7 3960x) реализует расчеты за 1 ч 40 мин.

### **Результаты численного моделирования штормовых ветров**

В трудах Н. В. Савиновой [1; 2] приводится подробное описание и анализ наиболее сильных штормов на Байкале, наблюдавшихся в периоды: 11–12/X 1959 г., 4/XI 1959 г., 7–8/X 1965 г., 6/VIII 1967 г. и 28–29/IX 1969 г. Для моделирования были взяты именно эти периоды. Каждый из указанных случаев максимальных штормов соответствует определенному типу ветра по классификации Н. В. Савиновой: юго-восточный, северо-западный, юго-западный, северо-западный/юго-западный, северо-восточный. Для всех выбранных случаев приведены карты модуля скорости и направления ветра. При составлении этих карт использовались наблюдения над ветром и атмосферным давлением на прибрежных, островных и судовых станциях Байкала [1]. Моделирование проводилось с учетом того, что в [1] поля ветра соответствуют моменту наибольшего развития шторма и указывается местное время, тогда как результат моделирования выдается для времени по Гринвичу.

Расчеты проводились для области моделирования  $51,2\text{--}55,8^\circ$  с. ш.,  $103,5\text{--}109,5^\circ$  в. д. При этом использовалась горизонтальная сетка размером  $85 \times 101$  точек с разрешением  $5 \times 5$  км. В расчетах применялись 18 вертикаль-

ных  $\sigma$ -уровней от поверхности земли до изобарической поверхности 500 гПа. Предварительные численные эксперименты показали, что горизонтальное разрешение в 5 км наиболее оптимально для этой задачи. Использование меньшего разрешения (большого шага сетки) приводит к недостаточной детализации полей ветра. С другой стороны, увеличение разрешения (уменьшение шага сетки) не улучшает в значительной степени детализацию полей ветра, в то же время это приводит к значительным временным затратам, необходимым на проведение расчетов.

Шторм 11–12/X 1959 г. (рис. 1, А) юго-восточного направления охватил только южную половину озера. Основной очаг шторма локализовался в районе станции Бабушкин, где скорости юго-восточного ветра достигли 17 м/с. Штормы, аналогичные описанному, повторяются приблизительно один раз в 4 года [1].

Шторм 4/XI 1959 г. (рис. 1, Б) – один из жестоких штормов по модулю скорости северо-западного направления. Прохождение тыловой части циклона, смещавшегося из районов Западной Сибири, и вторичных холодных фронтов сопровождалось мощным затоком холода [1]. Вследствие этого над большей частью озера возникли сильные северо-западные ветры. Максимальные модули скорости ветра локализовались в районах станций Сарма (28 м/с), Большая Бугульдейка (27 м/с) и Большое Голоустное (26 м/с). Наиболее спокойными оказались районы крайнего севера и юга озера, а также акватории, находящиеся под частичной защитой о-ва Ольхон и п-ва Святой Нос.

Шторм 7–8/X 1965 г. (рис. 1, В) юго-западного направления локализовался главным образом в северной части Байкала в районах станций Байкальское (22 м/с) и Нижнеангарск (20 м/с). Штормы, подобные описанному, могут наблюдаться ежегодно, а появление более жестоких, с усилением ветра до 20 м/с, вероятно один раз в 5 лет [1].

Шторм 6/VIII 1967 г. (рис. 1, Г) – исключительный по силе и территориальному распространению. Он характеризуется одновременным действием ветров северо-западного и юго-западного направлений. Возникновение этого типа шторма связано с интенсивным вторжением арктических воздушных масс и выносом тепла в Забайкалье из районов Монголии. Вероятность такого шторма один раз в 25 лет [1].

Шторм 28–29/IX 1969 г. (рис. 1, Д) относится к крайне редким штормам северо-восточного направления. Ядро максимальных модулей скорости ветра северо-восточного направления располагалось в районе станций Сухая (14 м/с) и Турка (14 м/с).

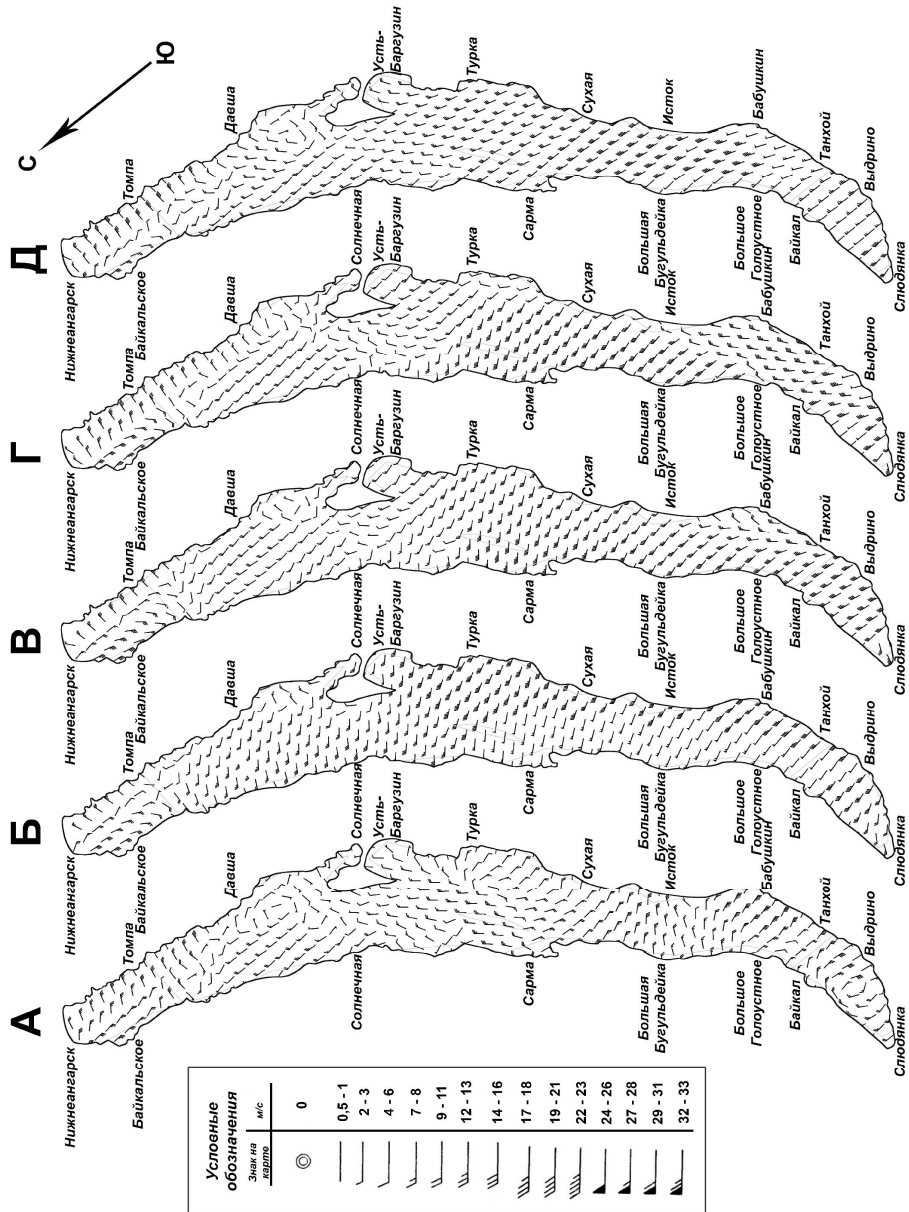


Рис. 1. Результаты численного моделирования штормовых ветров

## Подготовка результатов моделирования для сравнения с картами Атласа волнения и ветра на озере Байкал

Результатом работы программного комплекса WRF является бинарный файл формата NetCDF, содержащий в себе 190 различных метеорологических параметров в виде таблиц, где сверху указан номер долготы, а слева – номер широты всех точек области моделирования. На пересечении номеров широты и долготы записывается значение параметров. Такая организация данных называется сводной таблицей. Значение долготы и широты хранится отдельно в целях экономии дискового пространства компьютера. Подробнее с форматом NetCDF можно ознакомиться на сайте правообладателя – компании Unidata ([www.unidata.ucar.edu](http://www.unidata.ucar.edu)).

Существует множество программ, работающих непосредственно с файлами NetCDF. В нашем исследовании мы использовали свободно распространяемый макрос для Microsoft Excel от французского программиста Александра Брюкса. Его название «NetCDF4Excel». Данный макрос можно скачать по адресу <https://code.google.com/p/netcdf4excel>.

Для удобства после распаковки файла NetCDF в Excel из сводных таблиц были созданы списки. Методика этой операции описана в источнике [7].

Далее были выбраны точки области моделирования, входящие в акваторию оз. Байкал. Общее количество этих точек – 1375.

Для того чтобы произвести выборку параметров по интересующим точкам, были использованы функции Excel «Индекс» и «Поиск позиции». Подробно с этими функциями можно ознакомиться в источниках [8; 9].

Заключительным этапом подготовки является перевод компонентов поля ветра из декартовой системы координат в полярную. Длина вектора  $\rho$ , численно равная модулю скорости ветра, и направление вектора  $\varphi$  определяются соотношениями:

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2} ; \varphi = \arctg\left(\frac{u}{v}\right), \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  – компоненты вектора скорости по оси абсцисс и ординат в декартовой системе координат.

Чтобы количественно сравнить информацию по полям ветра для случаев жестоких штормов из Атласа волнения и ветра на озере Байкал [1] с результатами моделирования, необходимо было вручную выписать все данные по скорости и направлению ветра в 1 375 точках пяти карт Атласа так, чтобы координаты этих точек совпадали с используемыми в модели. Для этого в программе Photoshop [3] полупрозрачные отсканированные изображения карт из Атласа накладывались на карту Байкала, построенную в ArcView [4]. Затем соответствующие значения записывались в Excel.

С помощью программы ArcView [4] построены карты абсолютных отклонений направления ветра (рис. 2) и модуля скорости ветра (рис. 3) для случаев жестоких штормов 11–12/X 1959 г. (А), 4/XI 1959 г. (Б), 7–8/X 1965 г. (В), 6/VIII 1967 г. (Г) и 28–29/IX 1969 г. (Д). Условными знаками обозначено следующее: 1 – направление ветра [1], 2 – величина (модуль) скорости (м/с) [1], 3 – вектор скорости в пункте наблюдения [1], 4 – шкала отклонений.

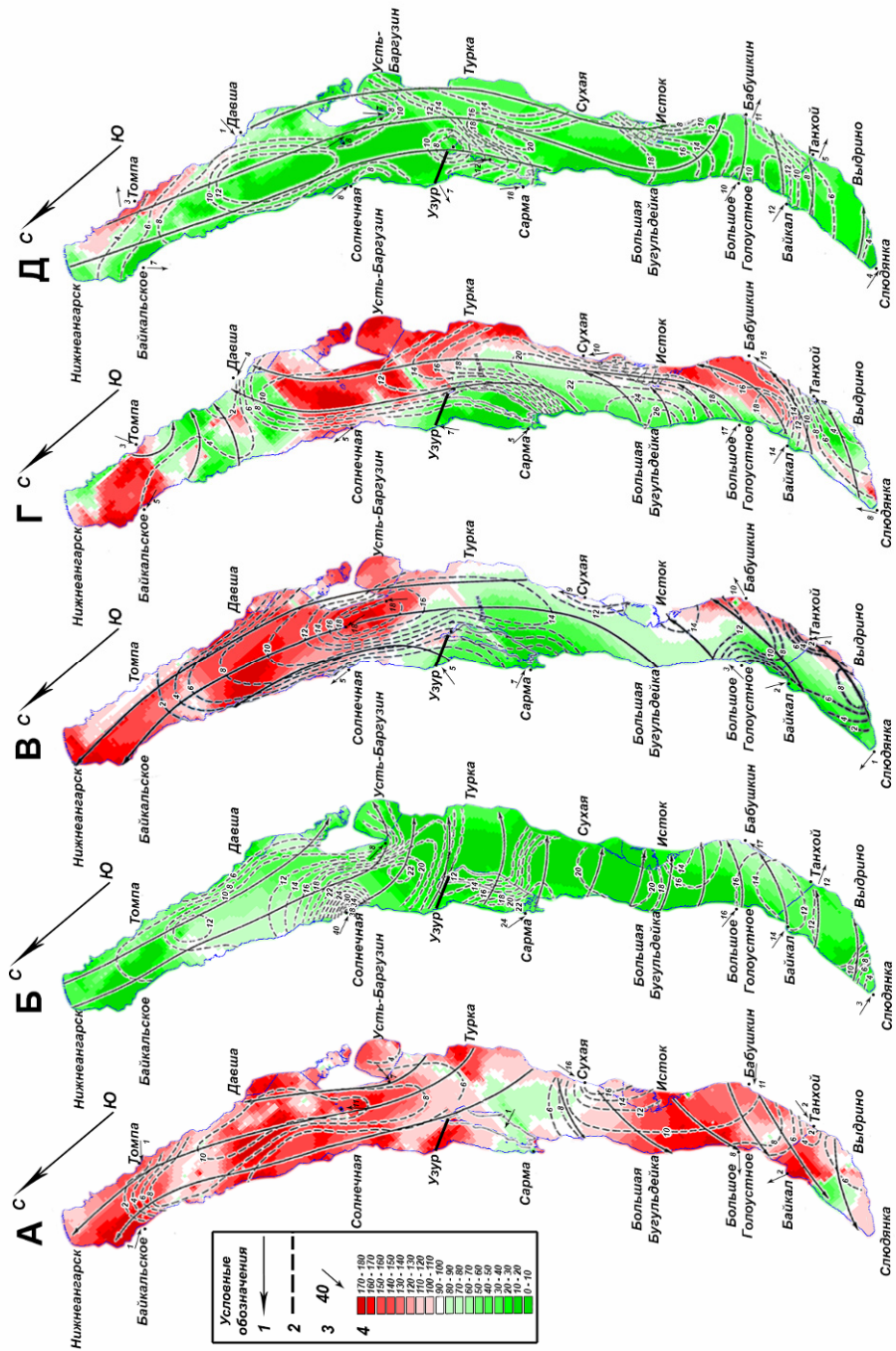


Рис. 2. Абсолютные отклонения направления ветра

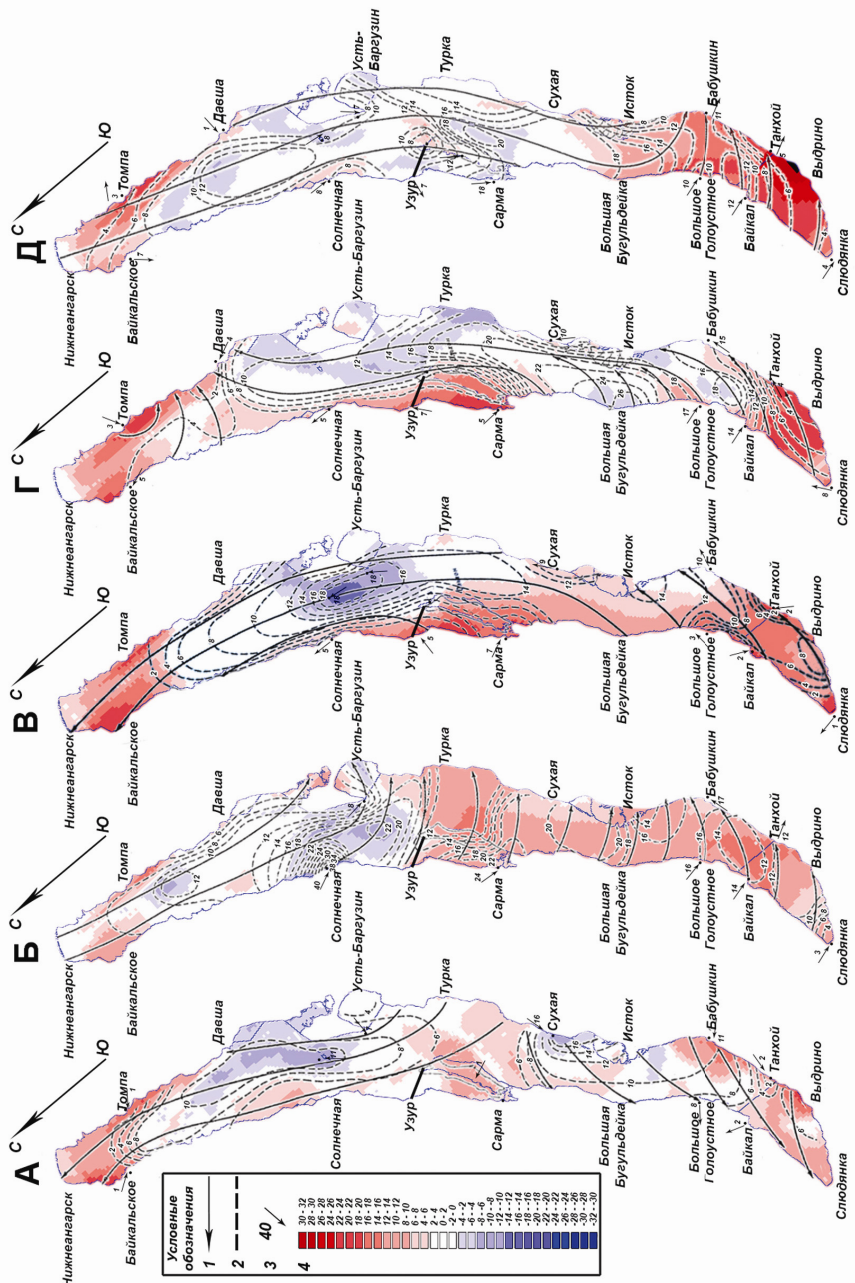


Рис. 3. Абсолютные отклонения модуля скорости ветра



## Выводы

Результаты, полученные с помощью численной модели WRF, совпадают с данными [1] с точностью до 85 %. Модель WRF может быть и в дальнейшем использована для изучения и прогнозирования ветрового режима оз. Байкал.

## Список литературы

1. Савинова Н. В. Атлас волнения и ветра озера Байкал / Н. В. Савинова [и др.] – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 117 с.
2. Савинова Н. В. Структура полей ветра на озере Байкал : дис. ... канд. геогр. наук / Н. В. Савинова. – Иркутск, 1975. – 227 с.
3. Маргулис Д. Photoshop для профессионалов / Дэн Маргулис. – М. : Интелбук, 2013. – 656 с.
4. Amir H Razavi. ArcView GIS Developer's Guide / Amir H Razavi. – Esri, 2008. – 149 p.
5. A description of the Advanced Research WRF Version 3 / W. C. Skamarock [et al.] // NCAR Technical Note. – 2008. – 113 p.
6. User's Guide for the Advanced Research WRF Version 3.5 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html>.
7. Создание списка из сводной таблицы [Электронный ресурс]. – URL: <http://exceltip.ru/создание-списка-из-сводной-таблицы/>.
8. Обзор функции «Индекс» [Электронный ресурс]. – URL: <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010069831.aspx>.
9. Обзор функции «Поиск позиции» [Электронный ресурс]. – URL: <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010062414.aspx>.

## Study of Storm Winds Over the Lake Baikal Using Numerical Model WRF

P. A. Naidenov, Lhamzhavin Zhambazhamts

**Abstract.** We have studied storms of different directions over Lake Baikal during the period from 1959 to 1971. We used the third version of the weather simulation program WRF (Weather Research and Forecasting). The results were compared with meteorological observations. Conclusions about the possibility of predicting the storm winds were made.

**Keywords:** Lake Baikal, numerical model wind field, storms modeling.

*Найденков Павел Андреевич  
аспирант, преподаватель  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-10-94*

*Naidenov Pavel Andreevich  
Postgraduate, Lecturer  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-10-94*

*Лхамжавын Жамбажамц  
преподаватель  
Монгольский государственный  
университет (МонГУ)  
141918, г. Улан-Батор, пр. Мира, 14  
тел.: (976) 77307730-6117*

*Lhamzhavin Zhambazhamts  
Lecturer  
Mongolian State University  
14, Mir st., Ulan-Bator, 14118  
tel.: (976) 77307730-6117*