

# Исследование мезомасштабных циркуляций над крупными озерами Западной Сибири по данным реанализов, регионального моделирования и дистанционного зондирования

Репина И.А. (1,2), Вазаева Н.В. (1), Шестакова А.А. (1),  
Гавриков А.В. (3), Медведев А.И. (2), Степаненко В.М. (2)

(1) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
(2) Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
(3) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН



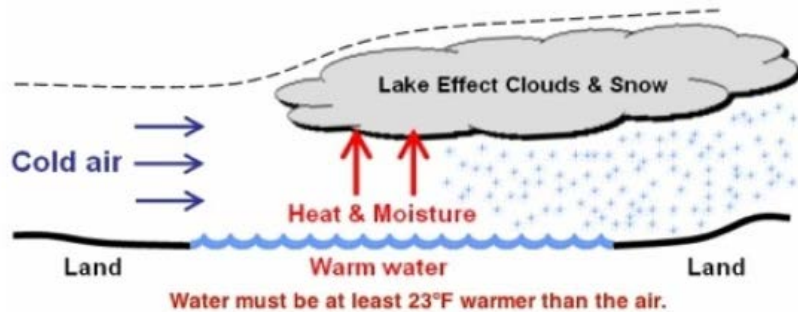
При поддержке РФФИ №19-55-44028



# Мотивация

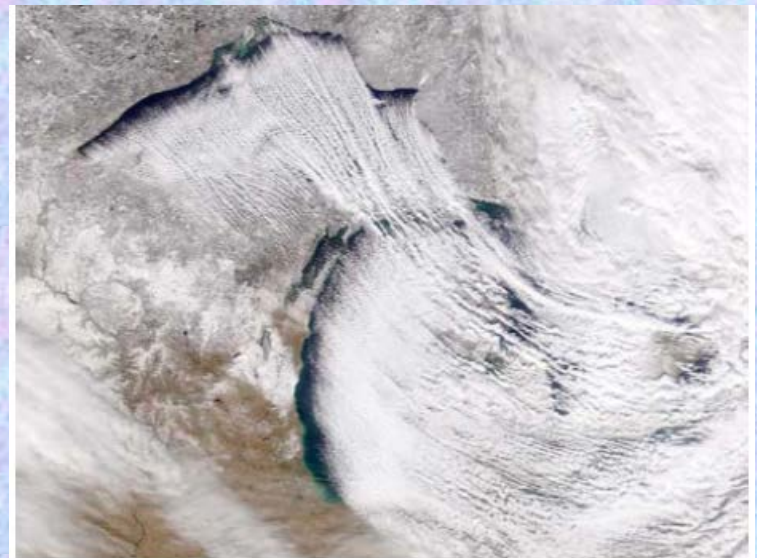
1. Озера являются важным элементом земной климатической системы, покрывая около 3% поверхности суши. Они могут служить значимым источником поступления в атмосферу тепла, влаги, а также парниковых газов, в особенности, углекислого газа и метана, а также оказывать серьезное влияние на климат окружающих регионов.
2. Включение озер в модели Земной системы требует разработки специализированных моделей, воспроизводящих термический, ледовый и биогеохимический режимы водоемов.
3. Мезомасштабные явления над озерами и окружающими территориями могут создавать опасные явления для авиации (при взлёте и посадке самолётов), морского транспорта и сельского хозяйства. При наличии горного рельефа и резких сезонных колебаний температуры воздуха вероятность возникновения мезометеорологических процессов усиливается.
4. С другой стороны, динамические атмосферные процессы, связанные с рельефом местности (катабатические потоки) и термическим режимом водоемов (холодные вторжения), могут также оказывать влияние на сроки ледостава, что затрудняет его моделирование.
5. Большие озера Восточной Сибири и Северной Монголии, в том числе крупнейшее пресноводное оз. Байкал, представляют особый интерес для проведения исследований.
6. Озеро Убсу-Нур представляет интерес как относительно большое замерзающее солёное озеро, расположенное среди неоднородного рельефа в зоне с резко континентальным климатом.

## Lake Effect Snow Conceptual Model



В умеренных и высоких широтах в осенний период поверхность озера оказывается теплее выхолаженных над сушей воздушных масс, что при холодных вторжениях воздуха с суши на поверхность озера приводит к формированию конвективных циркуляций. Возникающие при этом облачные структуры принимают форму как классических конвективных валиков, так и мезомасштабных вихрей

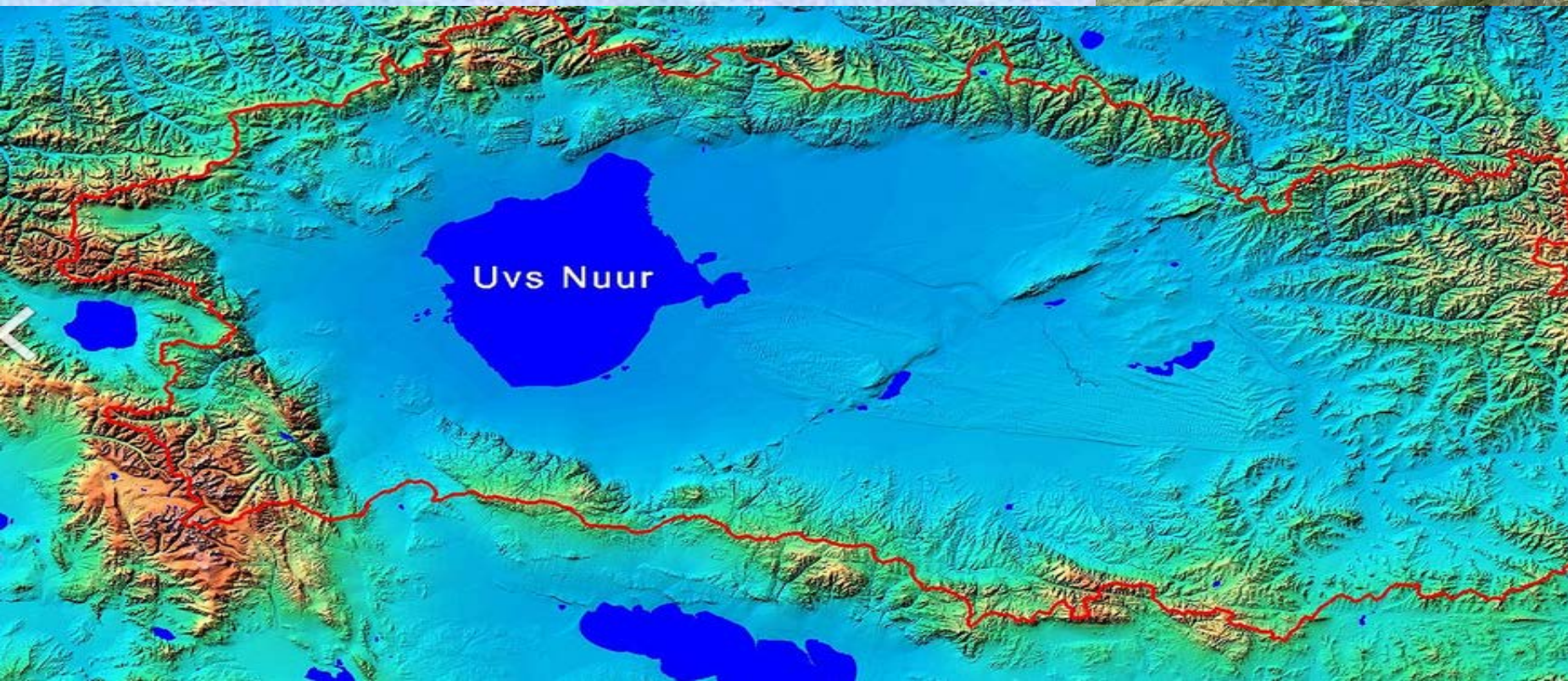
На подветренной стороне озёр возможно выпадение рекордных сумм осадков. Это явление хорошо известно на примере Великих Американских озер и Великого Соленого озера в штате Юта, где «озерные снегопады» наносят большой удар по экономике и транспортным системам регионов: из-за влияния озер годовое количество осадков увеличивается на 200% по сравнению с соседними районами



# Озеро Убсу-Нур



Площадь 3350 км<sup>2</sup>  
85x80 км  
Соленость  
14-18 ‰  
Средняя глубина  
10,1 м  
Средняя температура  
воздуха:  
июль 20°C, январь -32°C



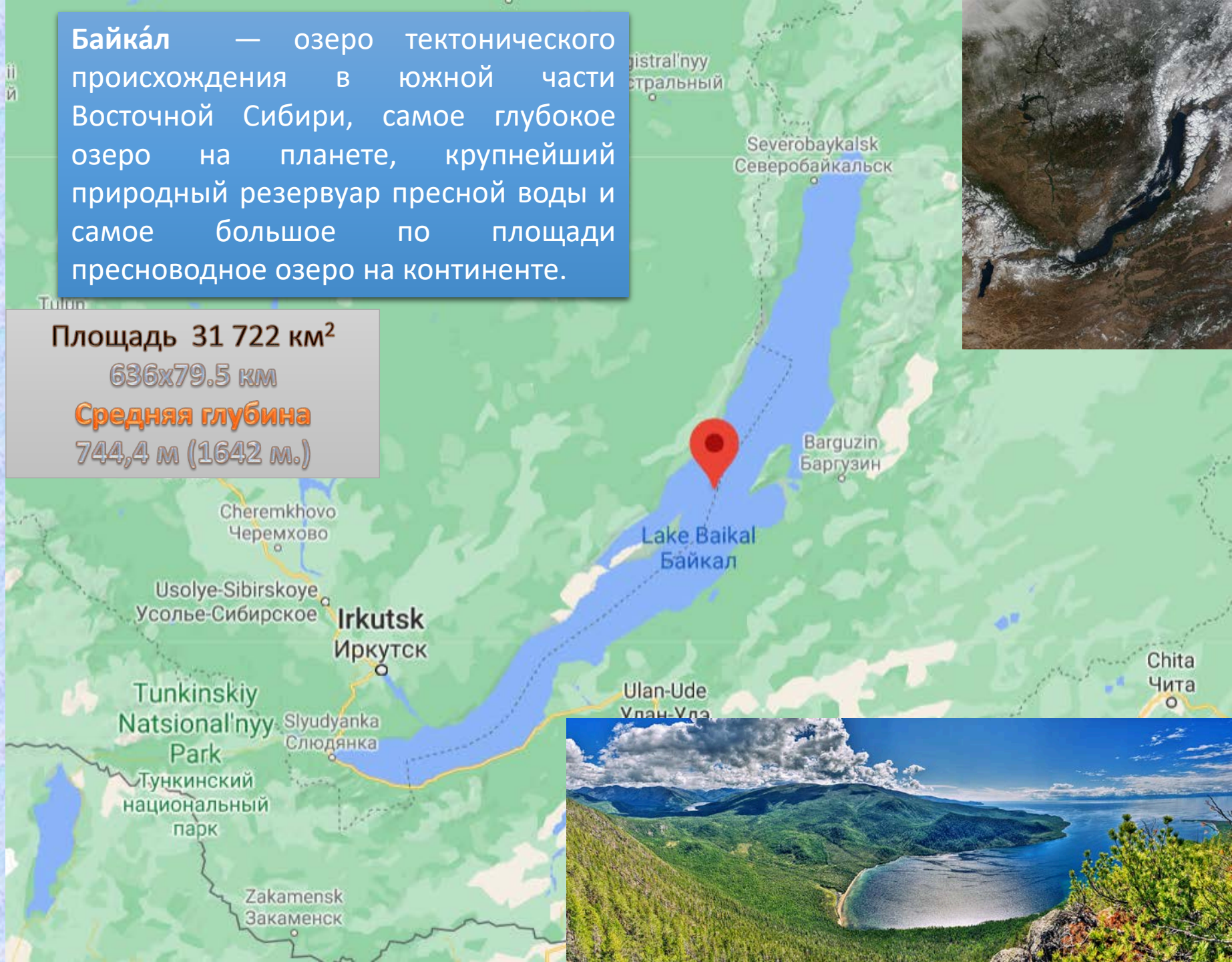
**Байка́л** — озеро тектонического происхождения в южной части Восточной Сибири, самое глубокое озеро на планете, крупнейший природный резервуар пресной воды и самое большое по площади пресноводное озеро на континенте.

Площадь 31 722 км<sup>2</sup>

636x79.5 км

**Средняя глубина**

744,4 м (1642 м.)



# Причины более позднего установления льда

28 ноября 2016 года (MODIS – видимый диапазон)



В ноябре на фоне холодных вторжений на относительно теплую поверхность озера формируется интенсивный мезомасштабный вихрь размером несколько десятков километров. По своим свойствам (взрывной характер формирования, наличие глаза) вихрь идентичен полярным мезоциклонам и предполагает большие скорости ветра. Ветер разрушает тонкий новообразованный ледяной покров. Холодные вторжения формируют кatabатические потоки с горных хребтов на западе и юге озера.

# Мезомасштабные вихри и холодные вторжения в разные годы по спутниковым данным

11 ноября 2000



22 ноября 2000



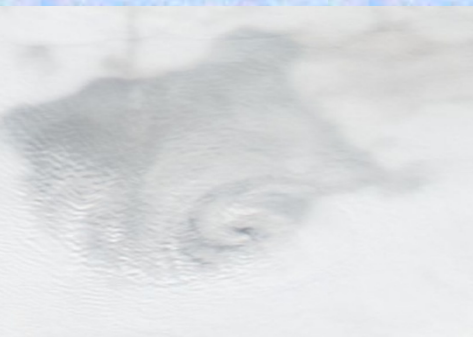
10 ноября 2004



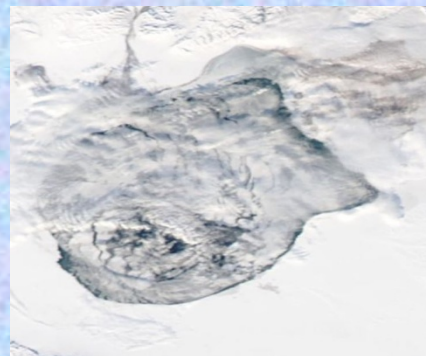
10 декабря 2004



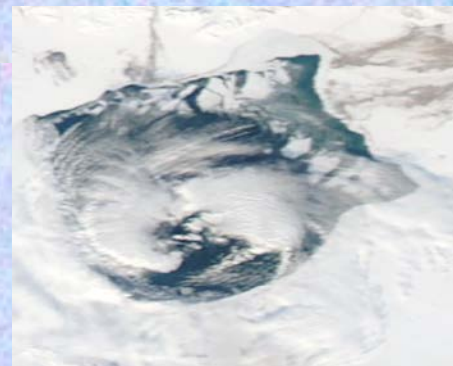
1 декабря 2006



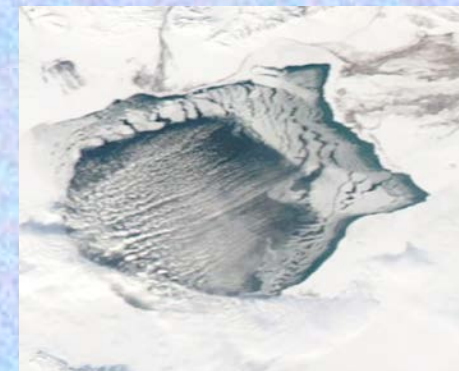
11 декабря 2006



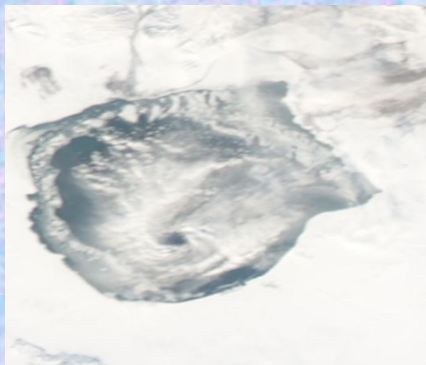
29 ноября 2007



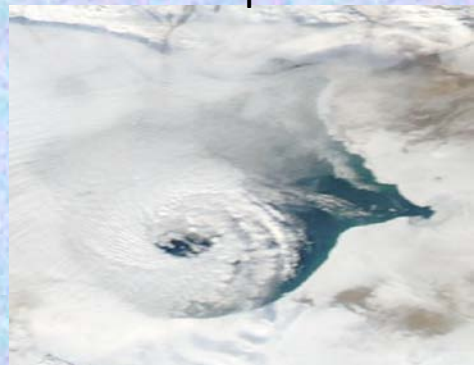
10 декабря 2007



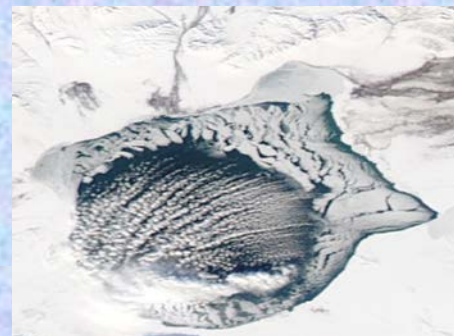
21 ноября 2009



29 ноября 2013



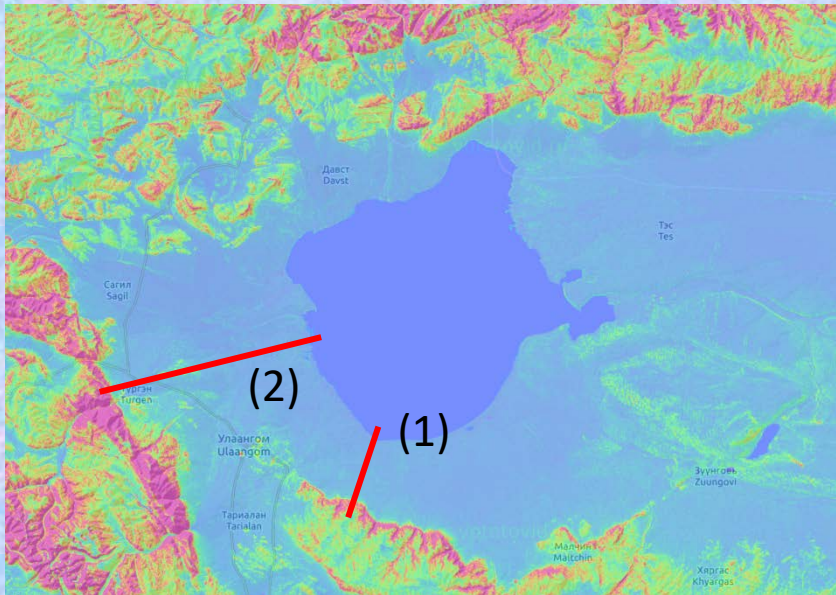
20 ноября 2016



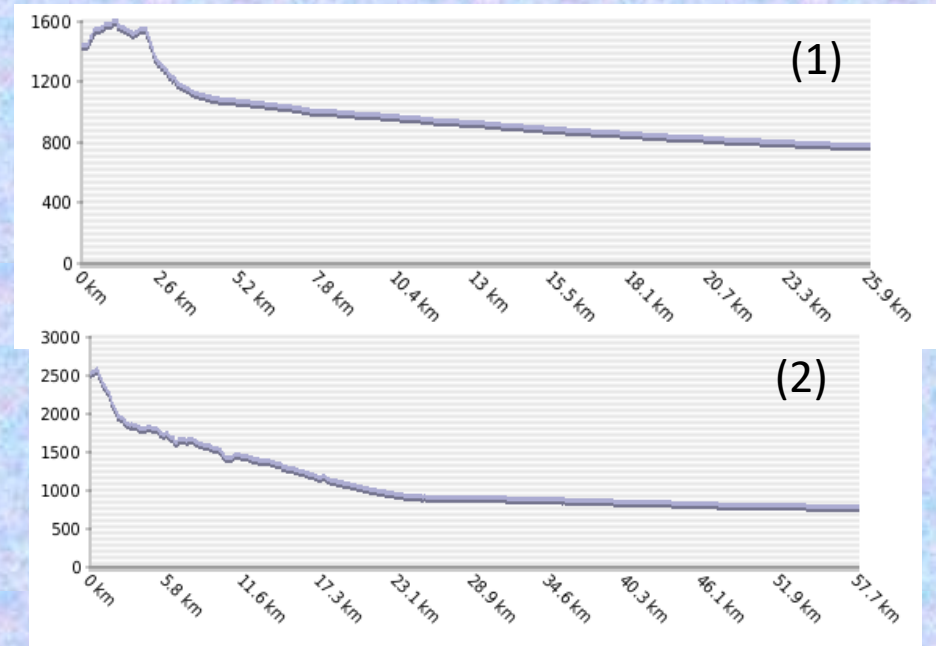
22 ноября 2016



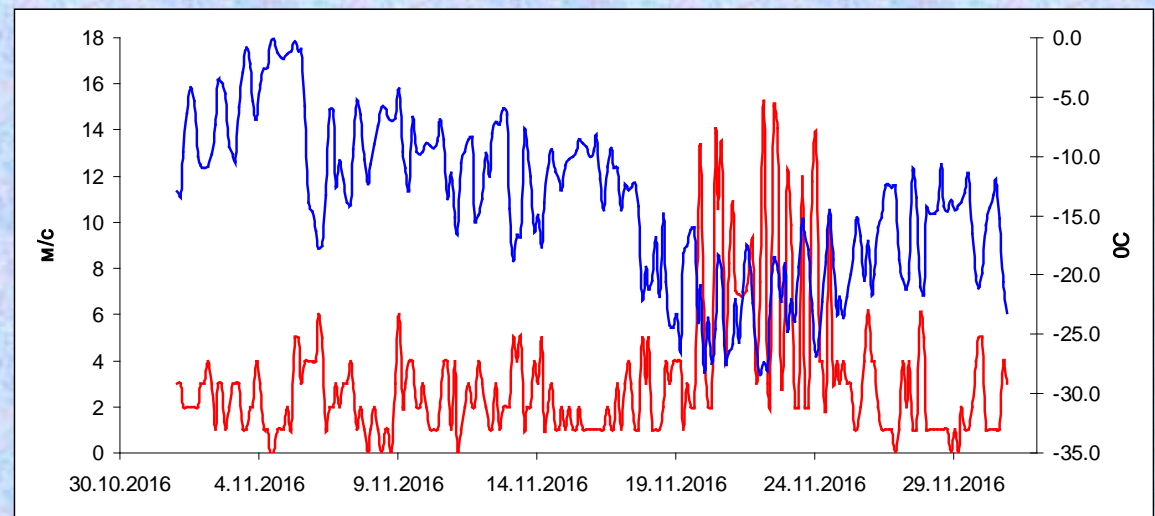
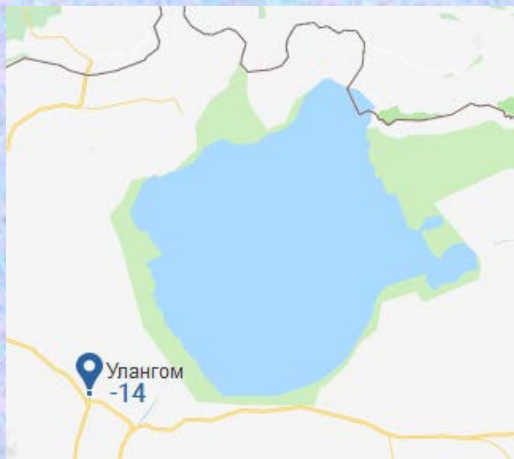
## Рельеф Убсунурской котловины



## Перепады высот рельефа



## Температура воздуха и скорость ветра на станции Улангом в ноябре 2016 г.



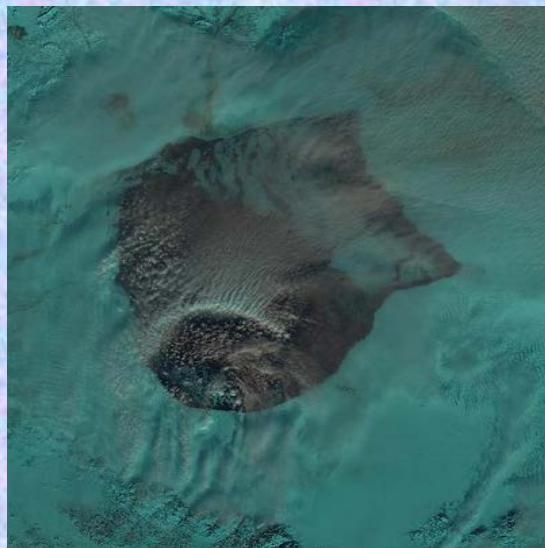
**Формирование вихря происходит на фоне падения температуры воздуха и усиления ветра**



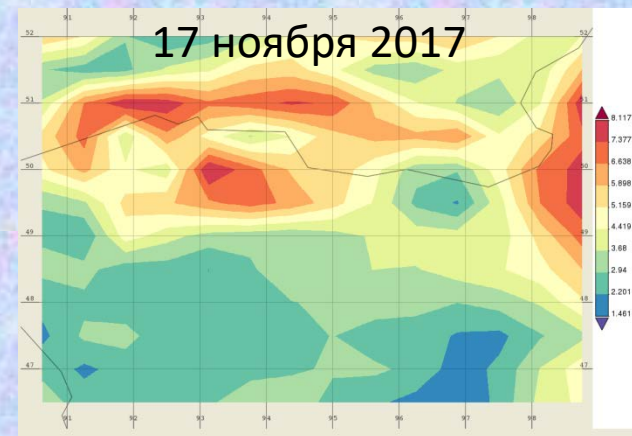
17 ноября 2017 sentinel 2a



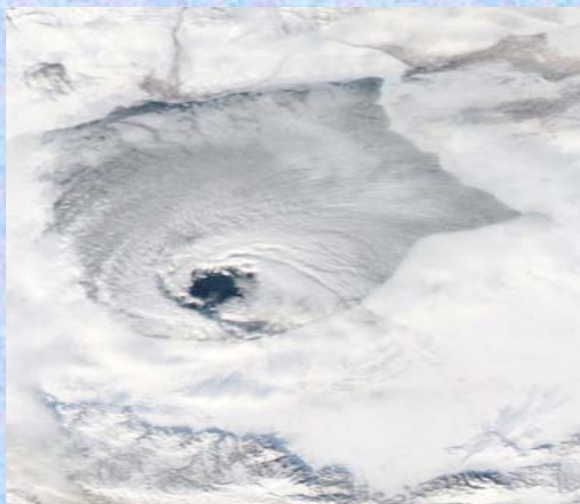
29 ноября 2017 г Landsat-8



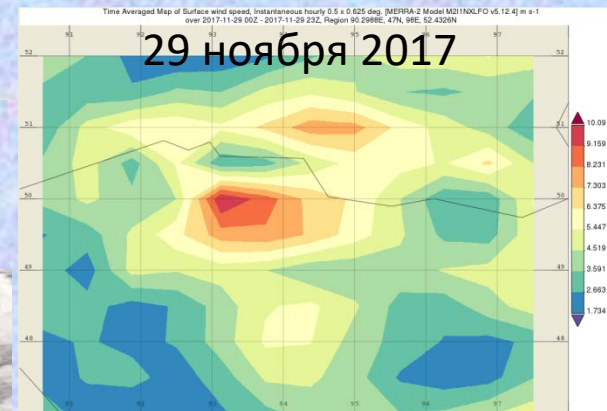
Скорость ветра, реанализ MERRA



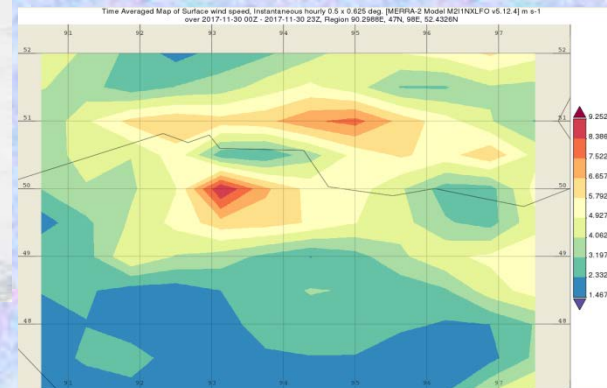
30 ноября 2017



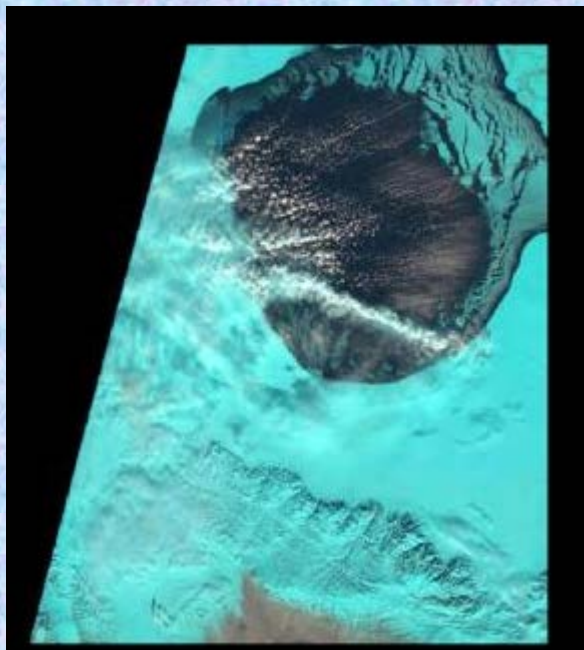
7 декабря 2017



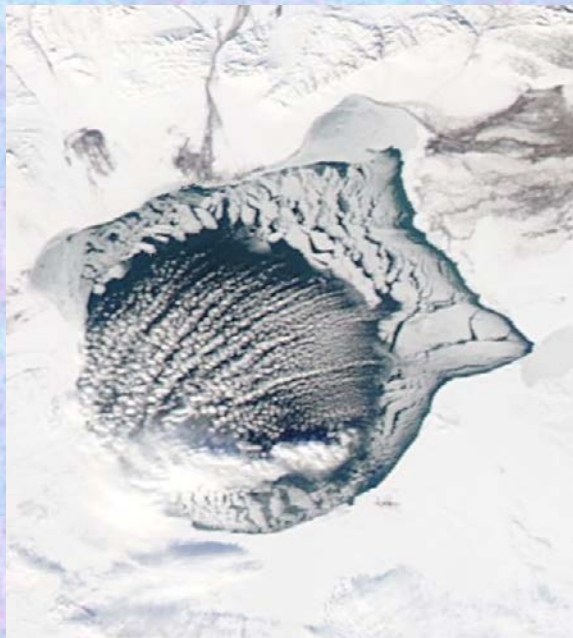
30 ноября 2017



19 ноября 2016 sentinel 2a



20 ноября 2016 MODIS



22 ноября 2016 sentinel 2a



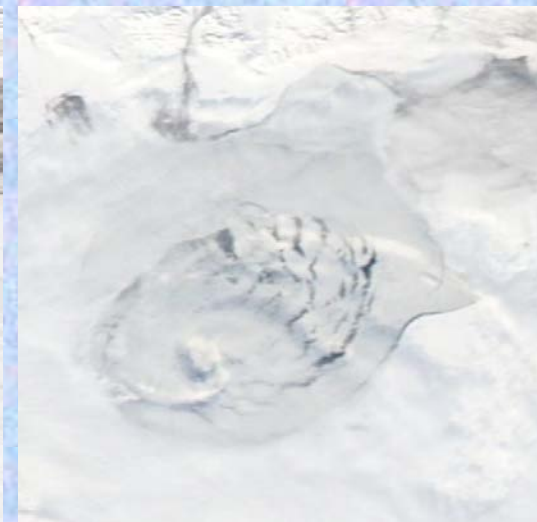
26 ноября 2016 LANDSAT-8



28 ноября 2016 MODIS

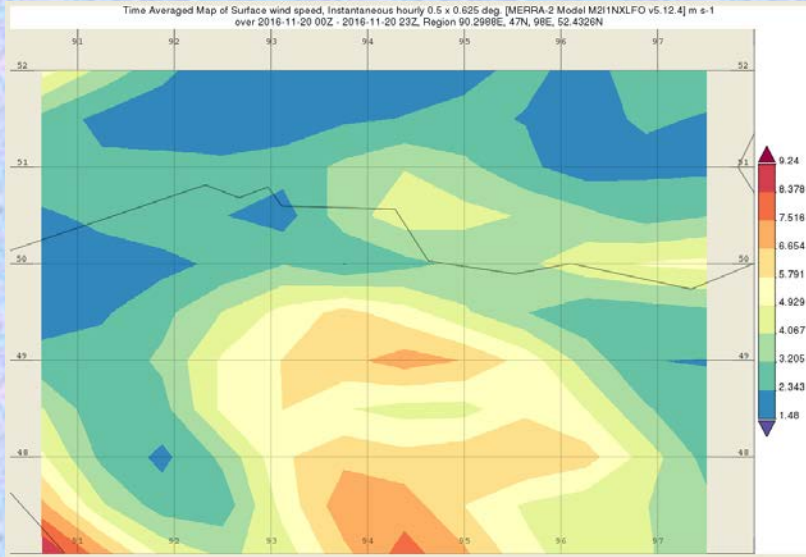


30 ноября 2016 MODIS

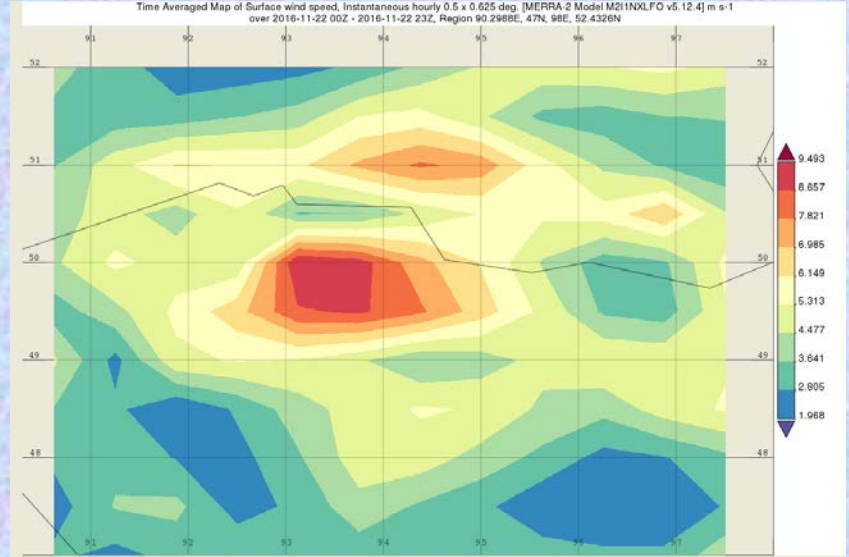


# Скорость ветра, реанализ MERRA

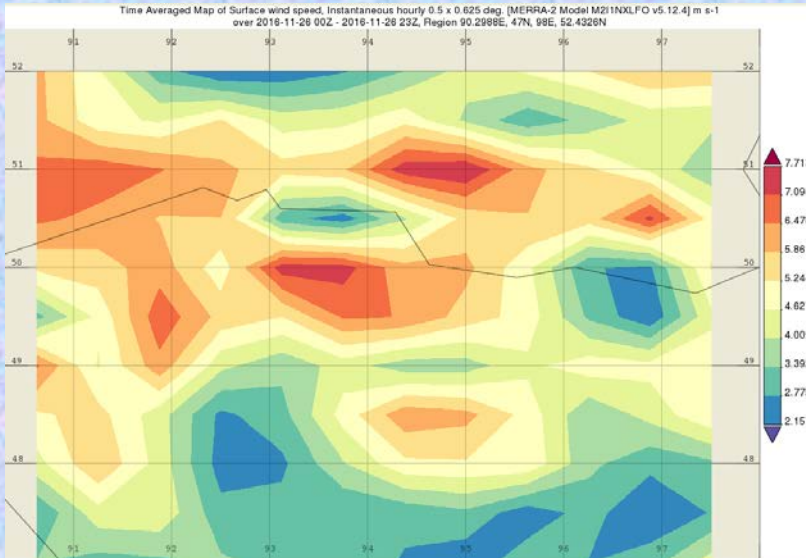
20 ноября 2016



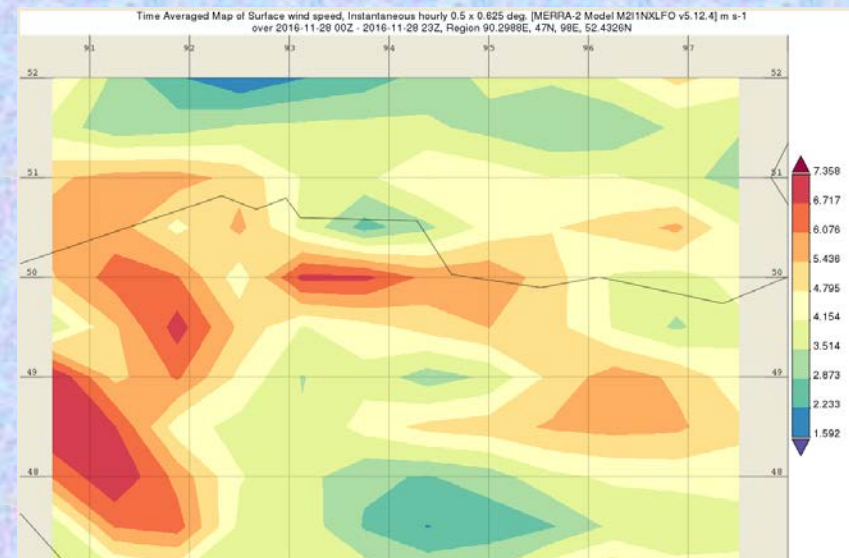
22 ноября 2016



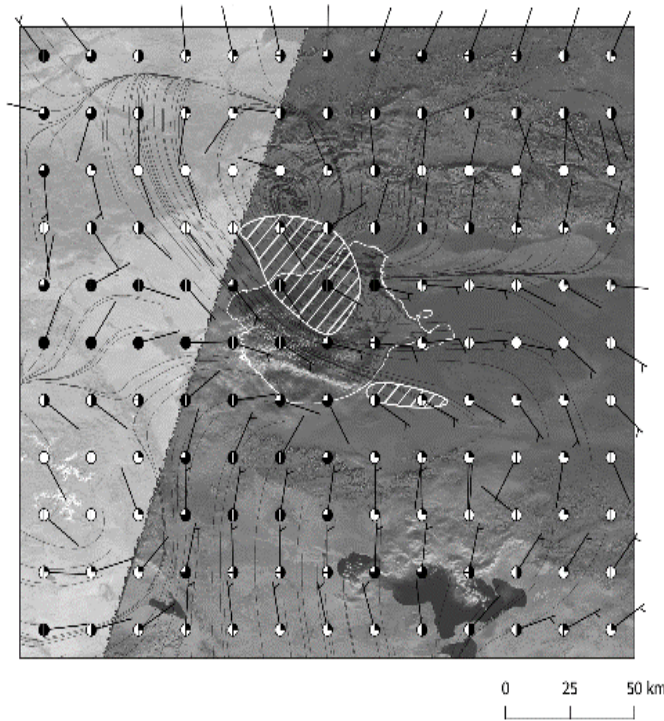
26 ноября 2016



28 ноября 2016



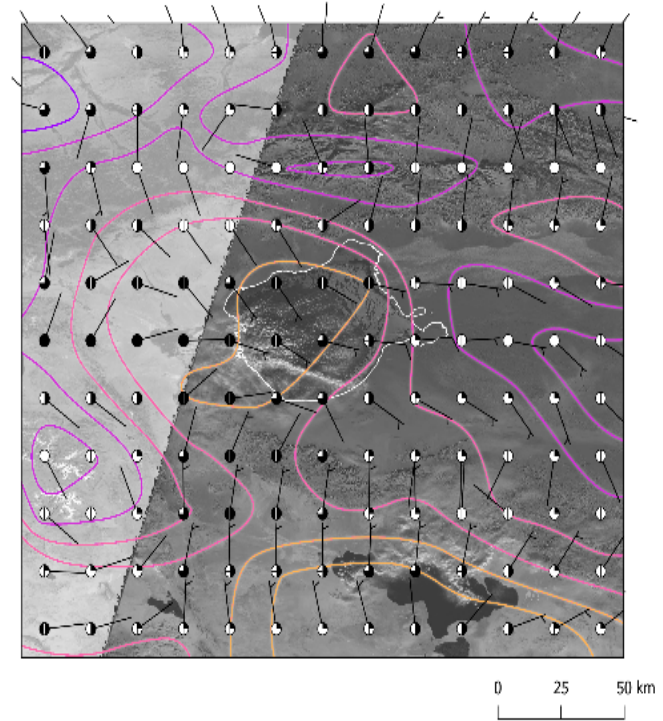
Uvs-nuur, 2016-11-19 ~10:10LMT  
MSI (Sentinel-2A) band 4 (Red) / ERA5 0.25×0.25°



Temp\_2m, °C

- < -25
- 25 - -20
- 20 - -15
- 15 - -10
- 10 - -5
- 5 - 0
- > 0

Uvs-nuur, 2016-11-19 ~10:10LMT  
MSI (Sentinel-2A) band 4 (Red) / ERA5 0.25×0.25°



Воспроизведение мезомасштабной циркуляции над озером Убсу-Нур по данным реанализа ERA5

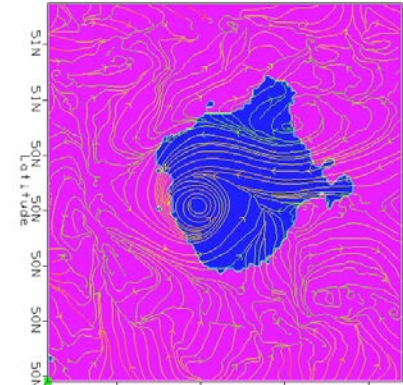
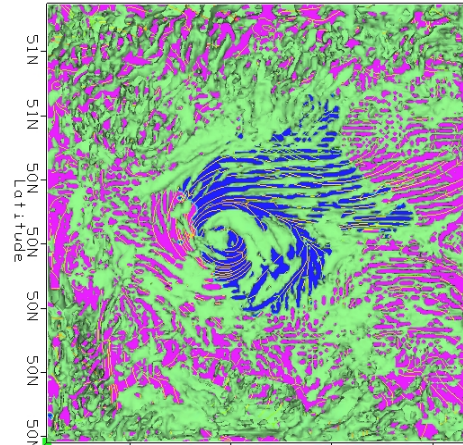
## WRF-ARW модель. Параметры сетки и схемы параметризации

Расчетное время	19.11.2016 00 UTC-1.12.2016 00 UTC
Количество вложенных сеток	3
Тип проекции карты	Lambert
Шаг сетки	9 000 м (9 км) / 3000 м (3 км) / 1000 м (1 км)
Количество шагов сетки в направлении север-юг	60/73/151
Количество шагов сетки в направлении восток-запад	60/73/151
Количество вертикальных уровней	40
Шаг по времени для первой области	15 с
Радиация	Rapid Radiative Transfer Model New Version
Поверхностный слой	Nakanishi and Niino PBL's surface layer scheme
Модель поверхности земли	Noah land-surface model
Атмосферный пограничный слой	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL
Микрофизика	WRF Single-Moment 6-class scheme
Параметризация облачности	Kain-Fritsch scheme/none/none

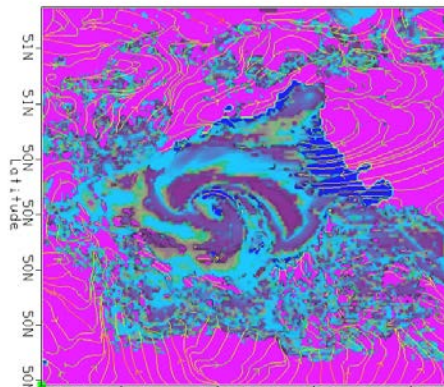
# 22 ноября 2016 года

Изоповерхности вертикальной скорости для уровней: 800-1000 гПа (0,02 м/с), линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 гПа

Линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 гПа

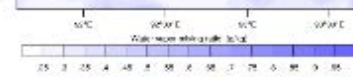
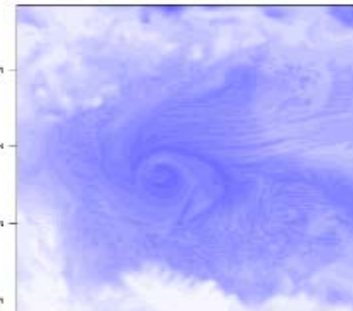


Доля облачности для уровней: 825-1000 гПа



REAL-TIME WRF

WRF model output showing cloud cover percentage.



WRF model output showing cloud cover percentage.

# Оз. Байкал. Мезомасштабные циркуляции

14 ноября 2017



10 декабря 2017



08 декабря 2018



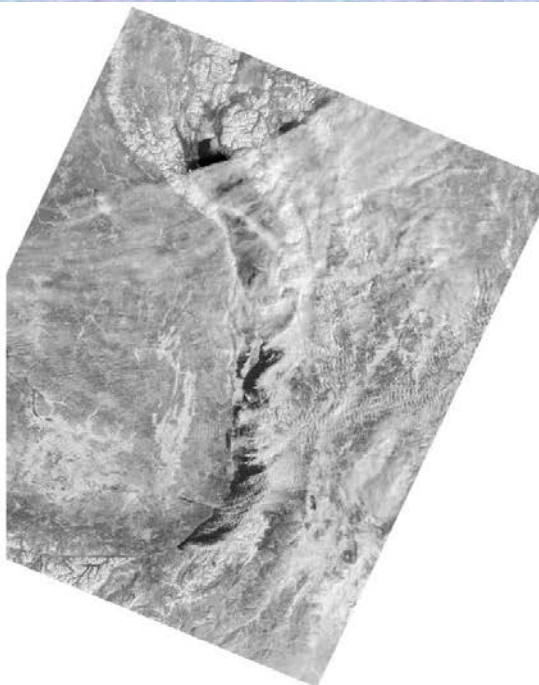
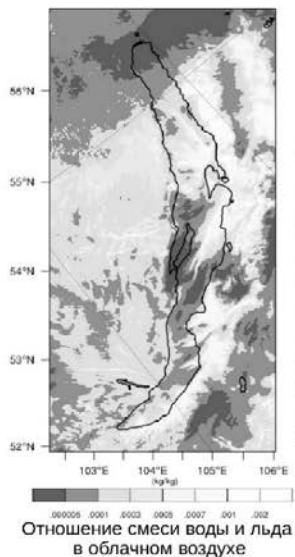
17 ноября 2019



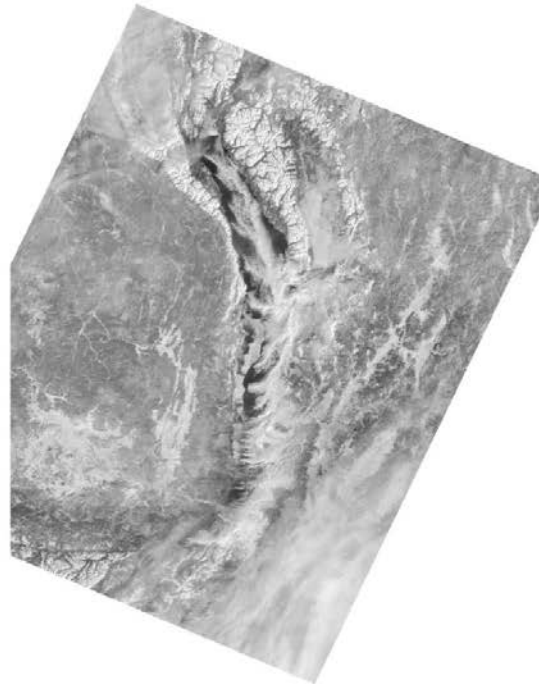
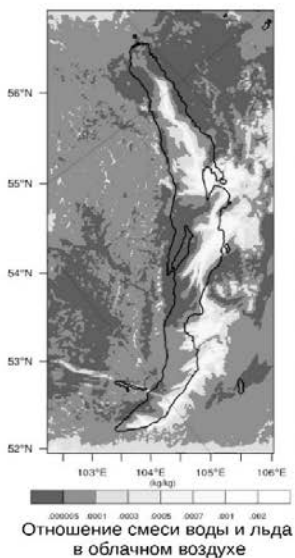
03 декабря 2019



17 ноября 2016

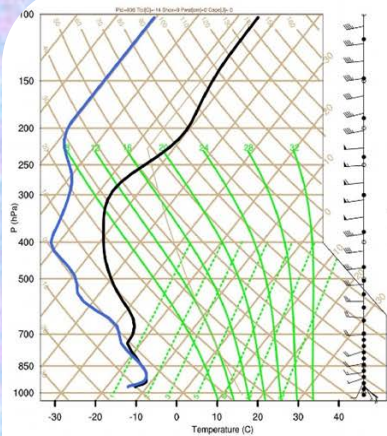


18 ноября 2016

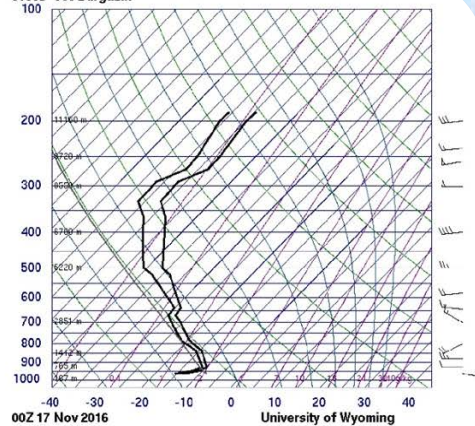


*Сравнение результатов моделирования облачности (слева) со спутниковыми снимками Terra в видимом диапазоне (справа)*



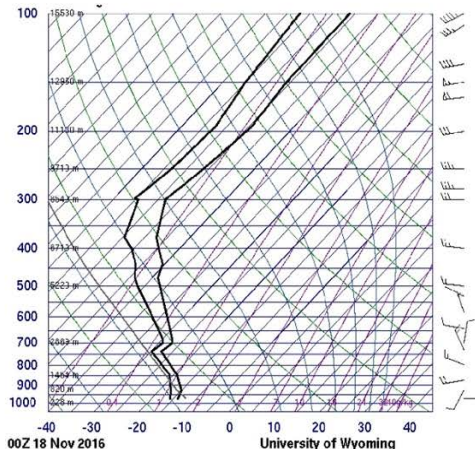
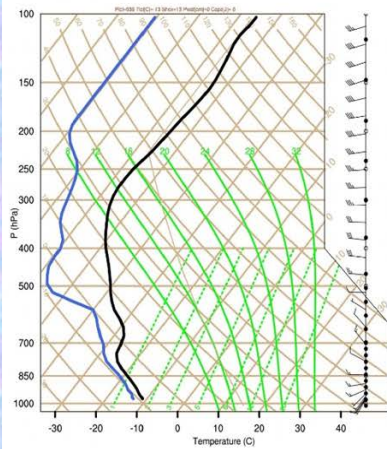


30635 Ust-Barguzin



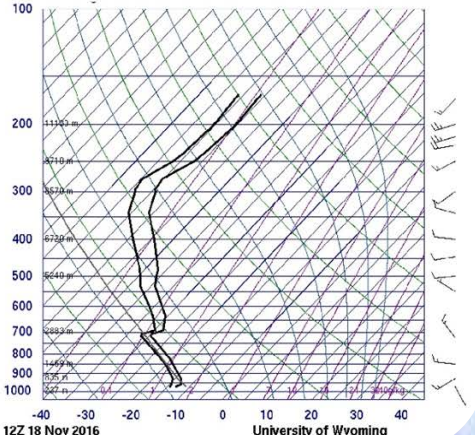
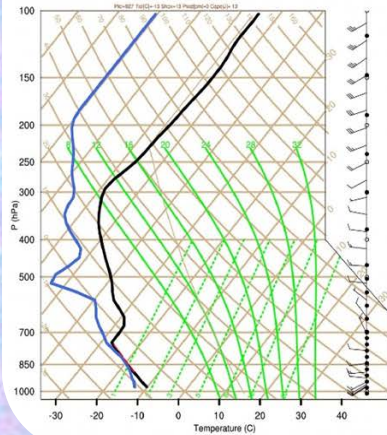
00Z 17 Nov 2016

University of Wyoming



00Z 18 Nov 2016

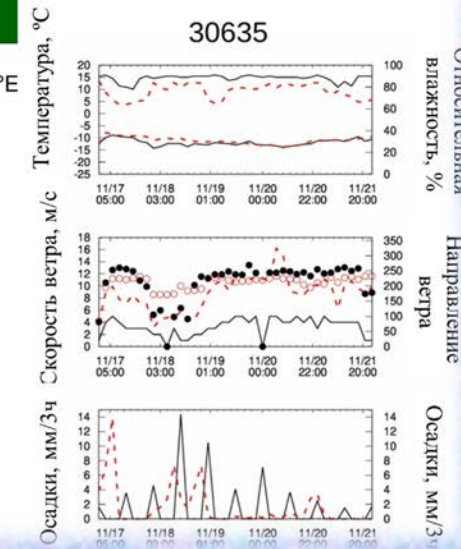
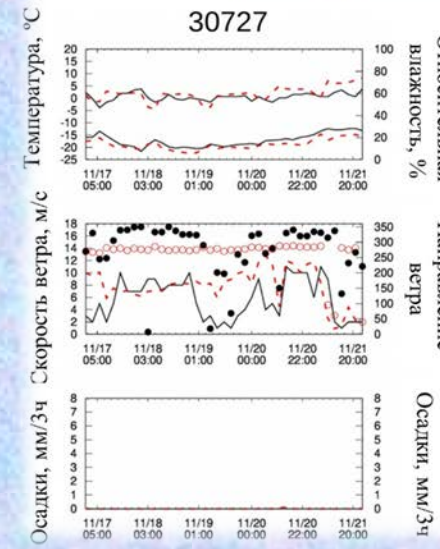
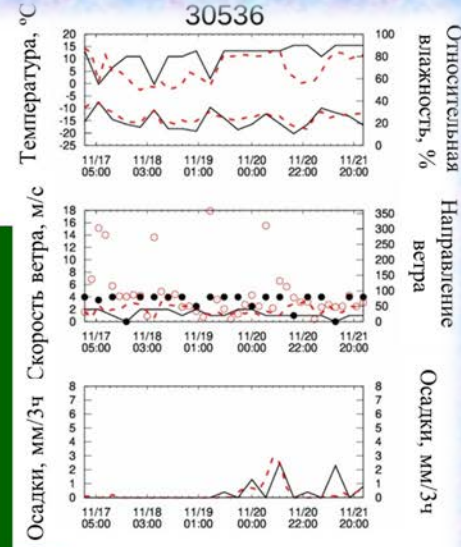
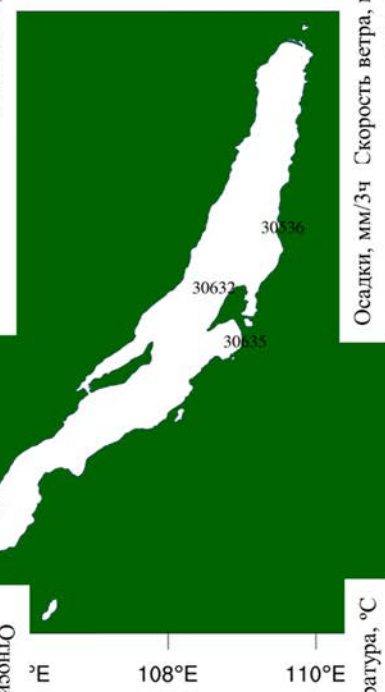
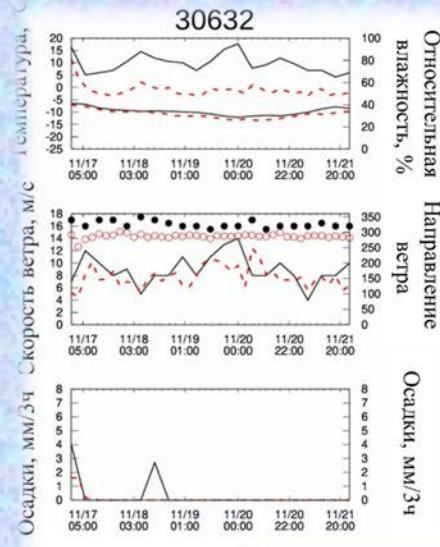
University of Wyoming



12Z 18 Nov 2016

University of Wyoming

*Сравнение результатов моделирования (слева) с данными радиозондирования (справа) на станции Усть-Баргузин*



*Сравнение результатов моделирования (красные линии и пунсоны) с данными приземных наблюдений температуры, относительной влажности, скорости и направления ветра и осадков на станциях (черные линии и пунсоны). Положение станций показано на схеме в центре*

# Выводы

Исследование генезиса и моделирование мезомасштабных процессов в атмосфере над озерами в горном рельефе представляет не только теоретический интерес, но и имеет большое практическое значение для разработки методов локального прогноза погоды и загрязнения атмосферы и гидросферы; изучения мезо- и микроклимата; инженерной защиты территорий, зданий и сооружений; анализа причин и прогноза последствий чрезвычайных ситуаций.

Реанализ ERA5 удовлетворительно воспроизводит общий характер наблюдаемой над циркуляции циркуляции. В реанализах NCEP и MERRA наблюдается повышение температуры воздуха над озером, но характерных изменений циркуляции не заметно. Реанализ MERRA при существовании вихря показывает ветровую аномалию в районе озера, но дает явно заниженные скорости ветра.

Специально разработанная конфигурация модели WRF хорошо зарекомендовала себя в проверочных расчетах при сравнении с данными спутниковых и контактных наблюдений и может быть использована для прогноза мезомасштабных циркуляций над озерами.