

Влияние атмосферных процессов на формирование ледового режима озера Убсу-Нур

И.А. Репина^{1,2}, В.М. Степаненко²

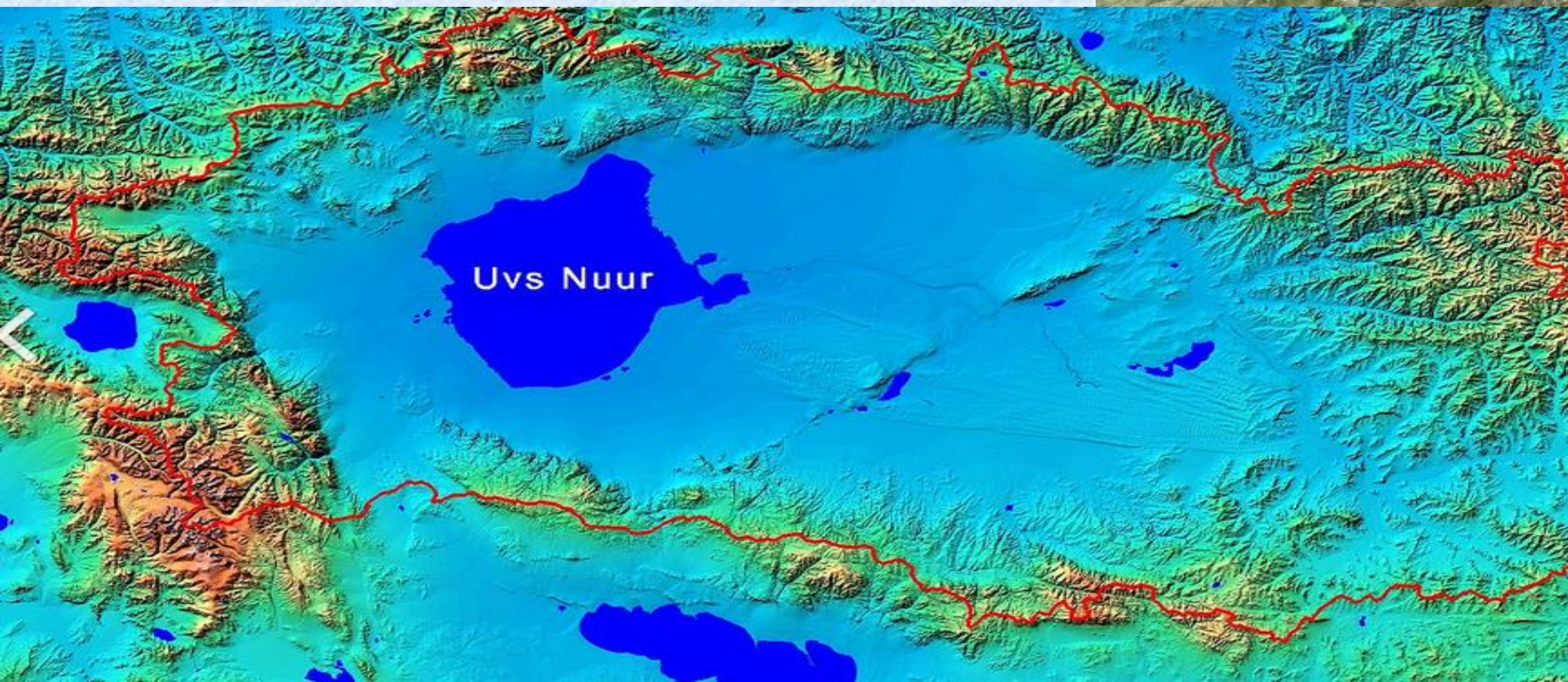
(1) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
(2) Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



Озеро Убсу-Нур



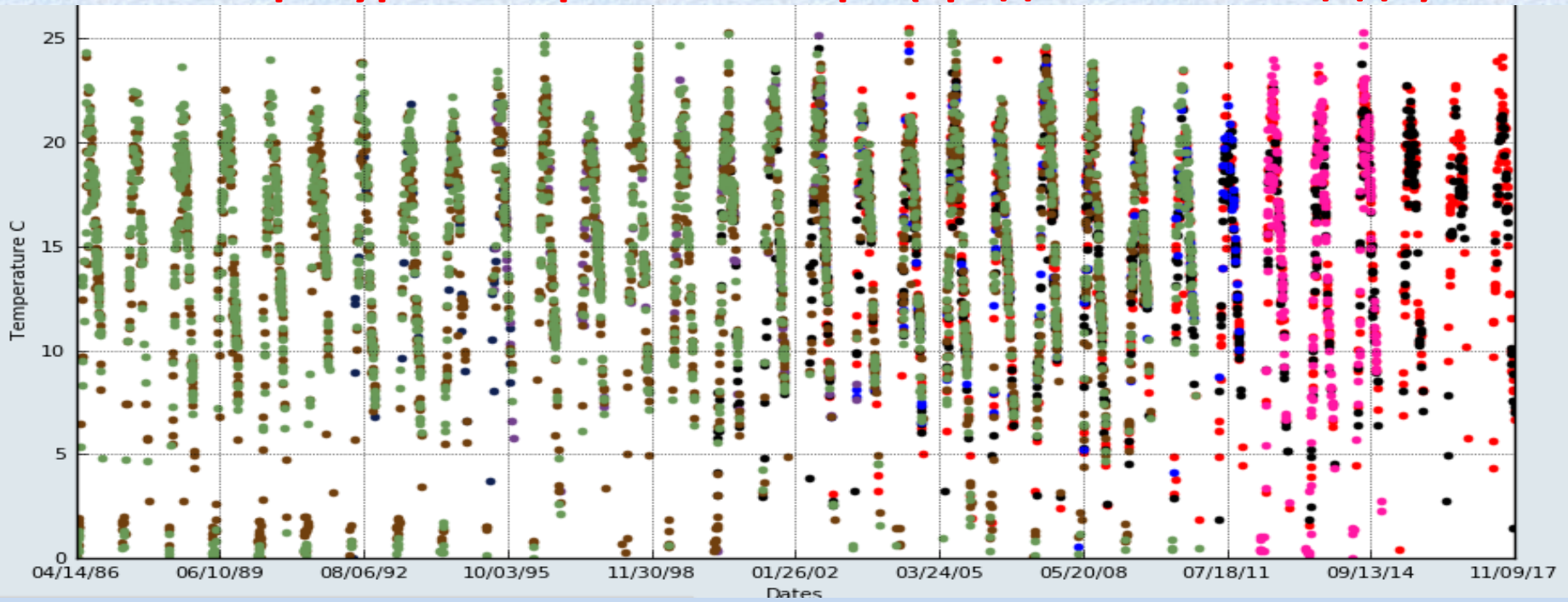
Площадь 3350 км²
85x80 км
Соленость
14-18 %
Средняя глубина
10,1 м
Средняя температура
воздуха:
июль 20°C, январь -32°C



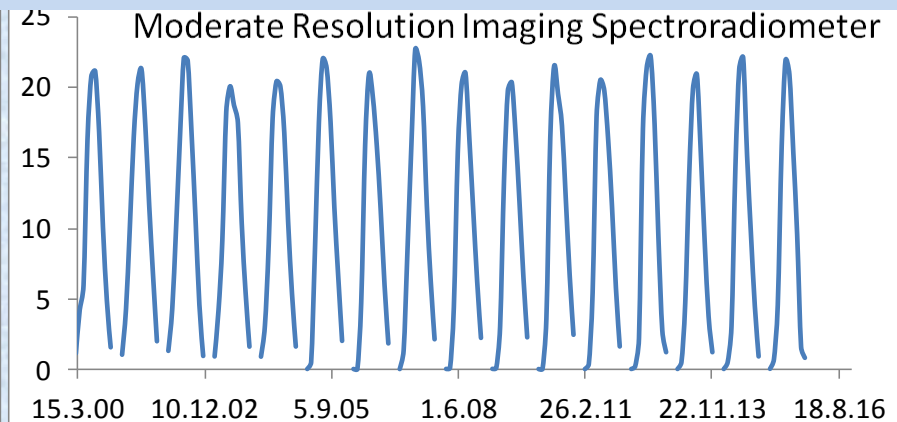
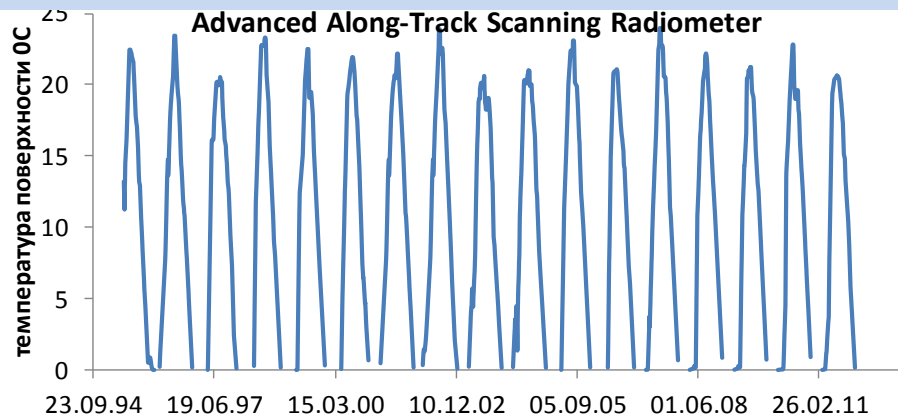
Мотивация

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. Ледовый режим озер является их важнейшей характеристикой, так как ледяной покров влияет на внутренние процессы водоемов и их взаимодействие с атмосферой. В условиях современных изменений климата сроки ледостава сокращаются, что повышает актуальность изучения физических механизмов ледообразования и разрушения ледяного покрова.
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. Соленые озера по объему водных масс лишь немногим уступают пресным – соответственно 104 и 125 тыс. км³, и значительное их количество расположено в районах с отрицательными зимними температурами. Но численному моделированию термодинамического и ледового режима солёных озёр уделено значительно меньше внимания, чем моделированию пресноводных объектов. При этом применение моделей эволюции морского льда к озерам невозможно из-за разных морфометрических характеристик морского и озерного ледяного покровов.
6. Озеро Убсу-Нур представляет интерес как относительно большое замерзающее соленое озеро, расположенное среди неоднородного рельефа в зоне с резко континентальным климатом.

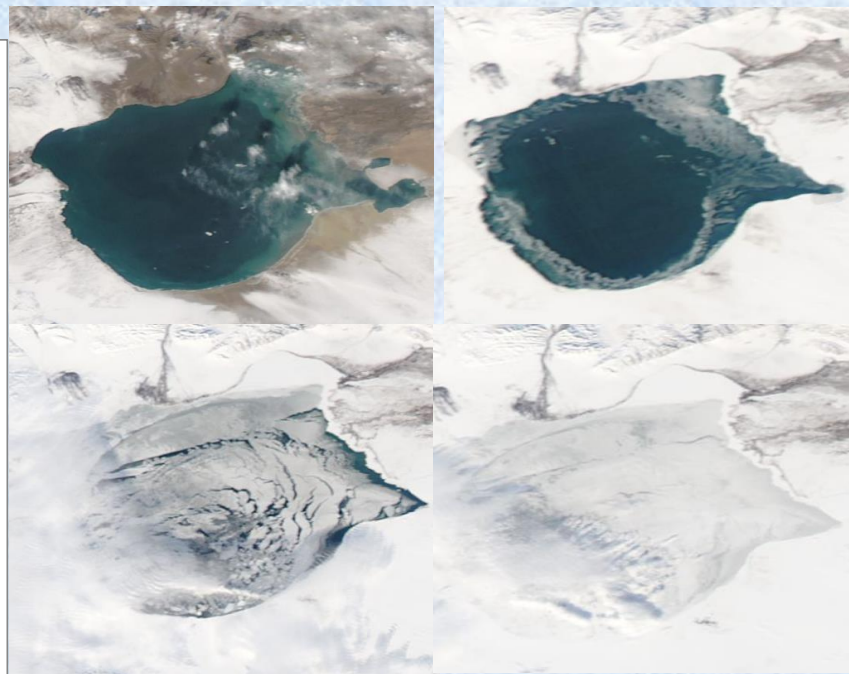
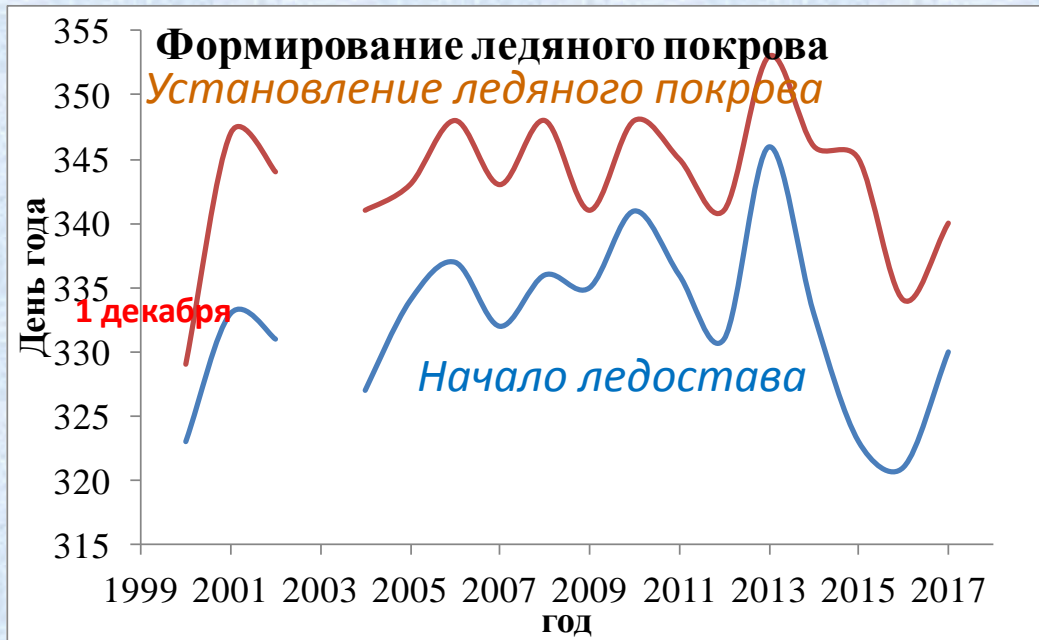
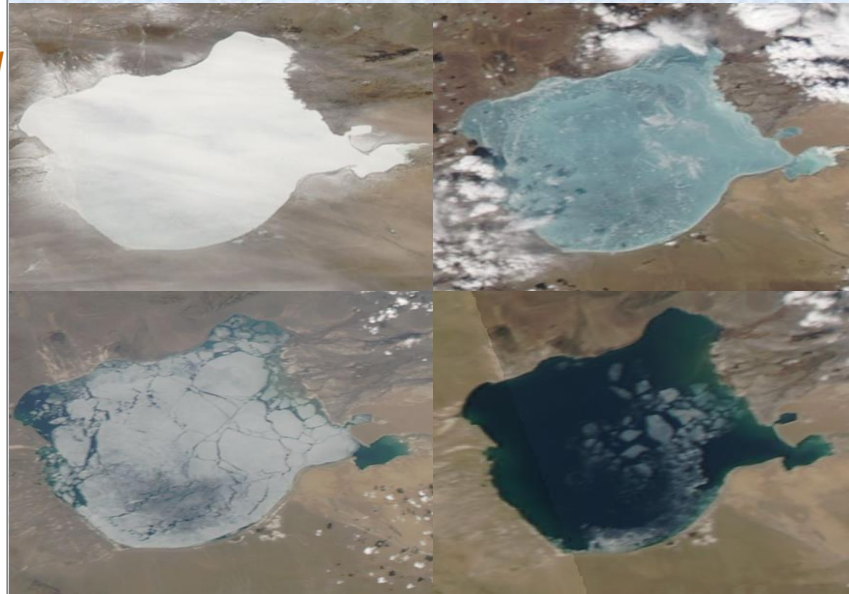
Температура поверхности озера (средняя по площади)



Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR) – ENVISAT, ATSR – ESA, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)



MODIS (AQUA, TERRA)

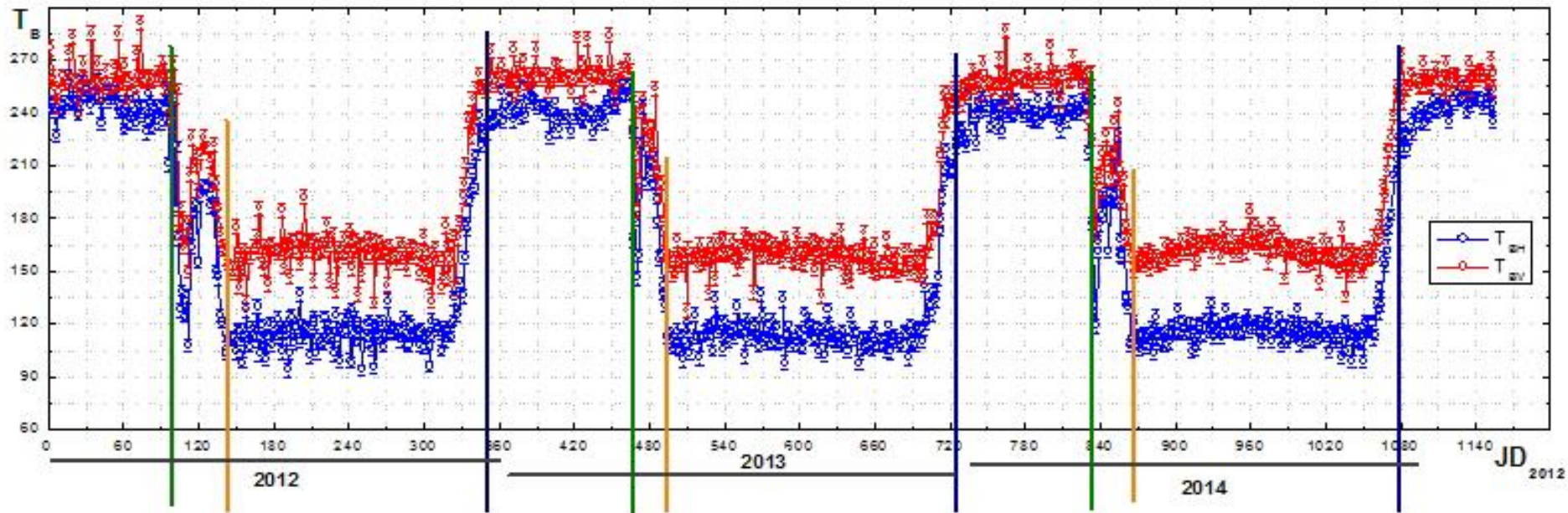


продукт L1C микроволнового радиометра MIRAS (спутник SMOS/ESA)

Ледяному покрову и открытой воде соответствуют разные яркостные температуры

Горизонтальная поляризация

Вертикальная поляризация



Хвостов И.В., Романов А.Н., Тихонов В.В. Шарков Е.А. 2017. Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледовым покровом. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 14(4), pp.149-154.

Одномерная модель водоёма LAKE-2.1 (Stepanenko et al., 2016)

➤ Учитываются процессы вертикального переноса тепла с учётом распространения коротковолновой радиации в слоях воды, льда, снега и нижележащего грунта (донных отложений).

➤ Уравнения модели сформулированы относительно осреднённых по горизонтальному сечению водоёма величин, что приводит к явному учёту обмена импульсом, теплом и растворёнными веществами между водной средой и наклонным дном.

➤ В толще воды используется k - ε параметризация турбулентности.

➤ В слое снега учитывается перенос жидкой влаги, а в слое грунта – возможность её замерзания.

➤ Учитывается вертикальная диффузия растворённых газов CO_2 , CH_4 , O_2 , а также их пузырьковый перенос, продукция и окисление метана, фотосинтез и процессы потребления кислорода.



Параметры численных экспериментов с моделью водоёма LAKE 2.1.

Максимальная глубина водоёма	22 м
Начальная солёность воды	17 ‰
Коэффициент ослабления видимой радиации в воде	0,4 м ⁻¹
Коэффициент ослабления видимой радиации во льду	3 м ⁻¹
Альbedo воды	0,06
Альbedo льда	0,4
Альbedo снега	0,85
Период интегрирования модели	01.01.1979 – 31.12.2015
Вертикальное разрешение	20 слоёв
Шаг по времени	20-30 с

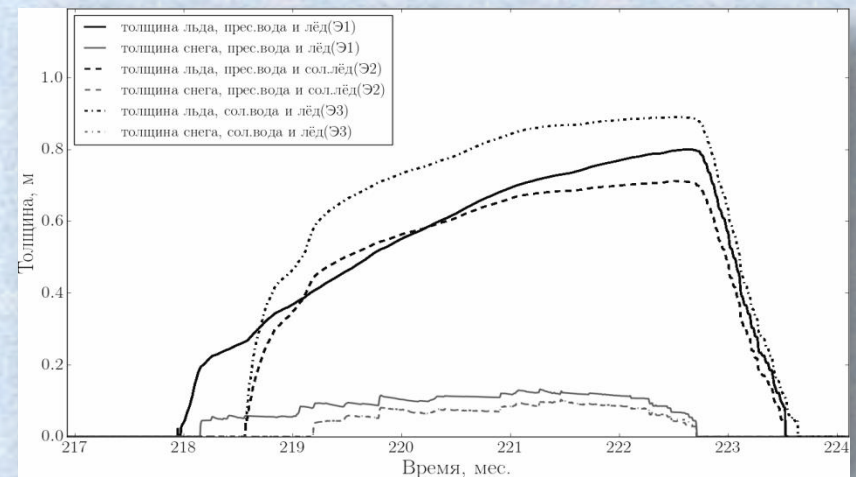
- Эксперимент Э1: вода, и лёд считаются пресными;
- Эксперимент Э2: учитывается солёность воды, но лёд остаётся пресным, т.е. при образовании льда все соли остаются в воде;
- Эксперимент Э3: солёность воды и льда рассчитываются

➤ В версии LAKE 2.0 лёд считается пресным, а его теплофизические свойства однородными по вертикали.

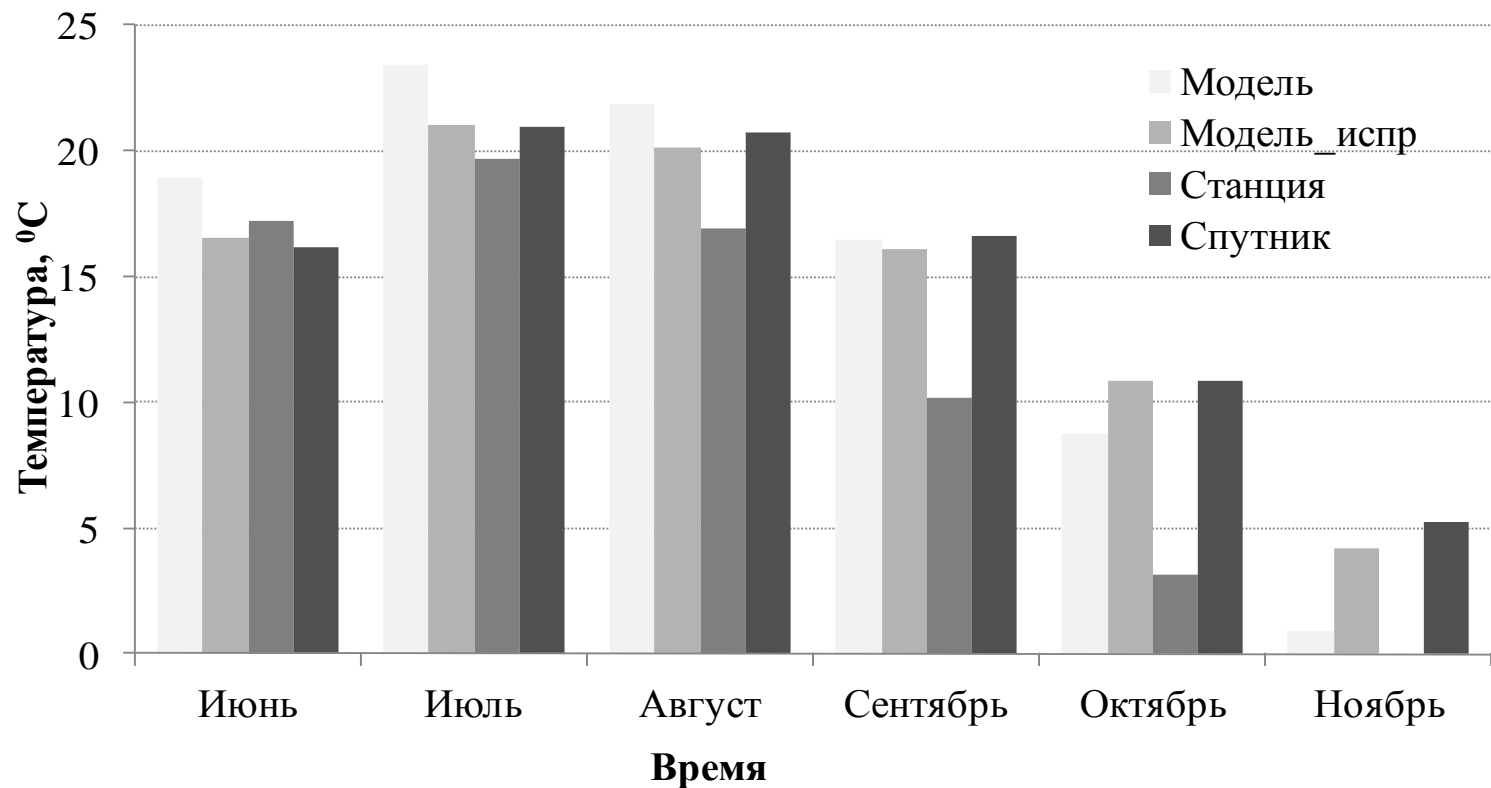
➤ В версии 2.1 вводится пористость льда, занятая только жидкой водой с растворёнными солями. Объёмная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности пористого льда рассчитываются согласно объёмным долям воды и льда

➤ сток солей из ледяного покрова полагается пропорциональным плотности солей в ледяном покрове .

➤ Учитывается влияние замерзания или таяния льда на солёность воды



Временной ход толщины снега и льда на оз. Убсу-Нур по данным новой версии модели LAKE, в трёх численных экспериментах: Э1, Э2, Э3. Зима 1996-1997 гг.

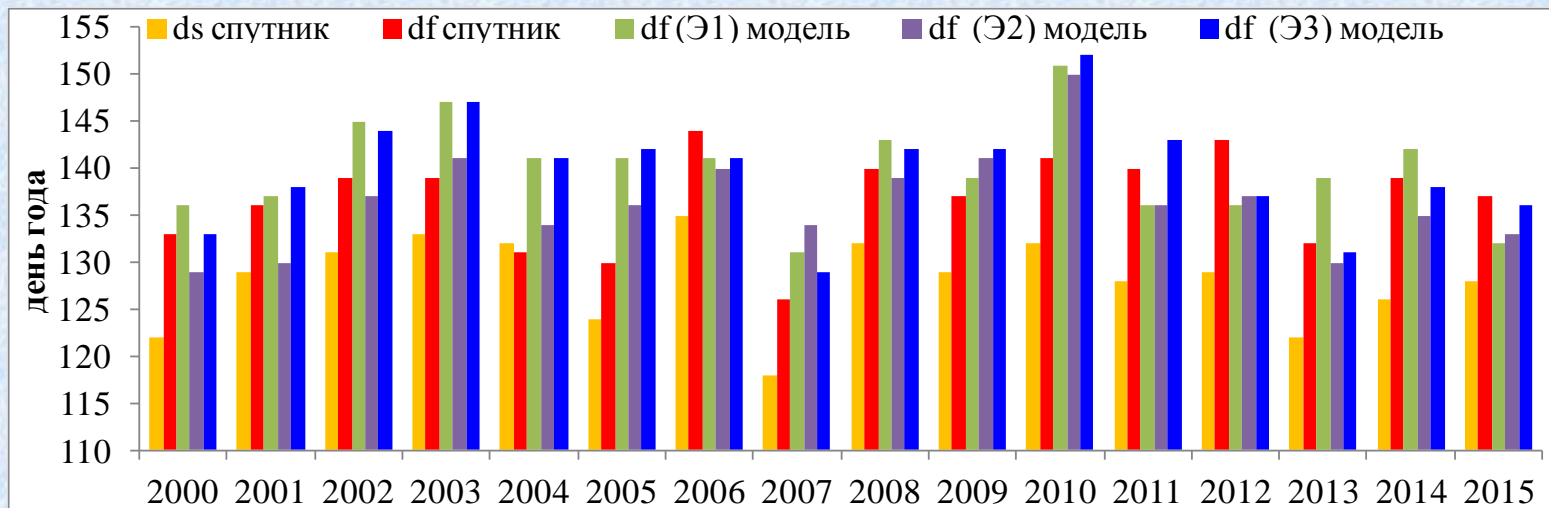


Среднемесячная температура поверхности оз. Убсу-Нур за период 2001-2015 гг.:

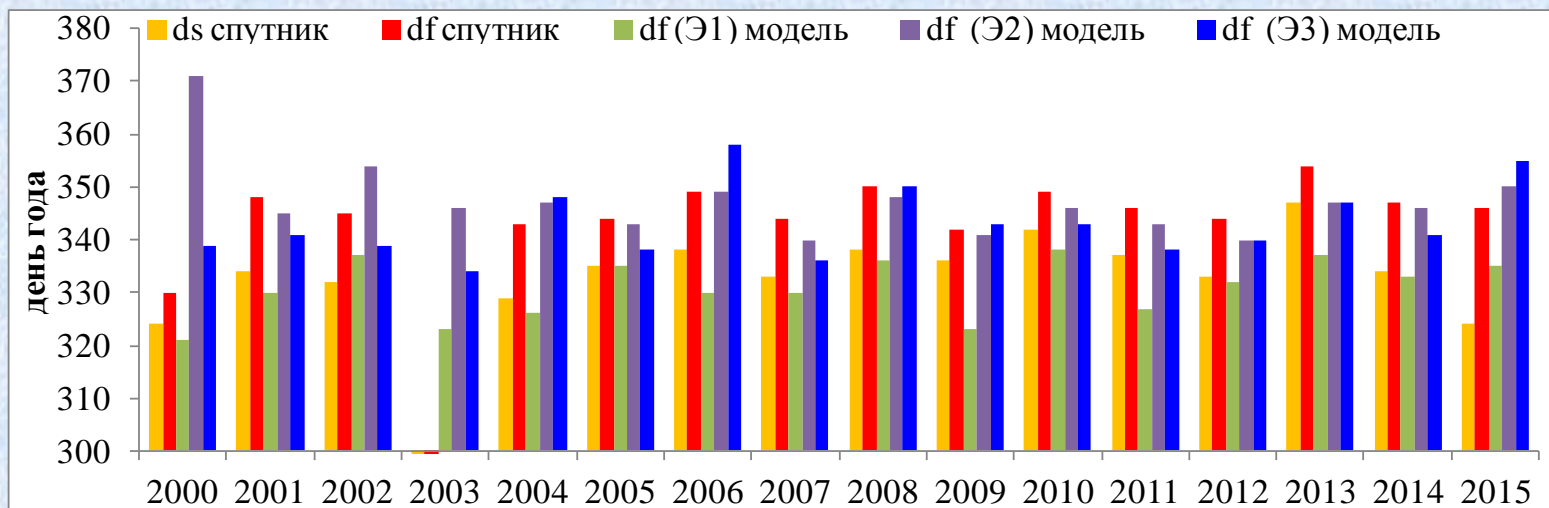
- ❖ по результатам расчётов исходной версией модели LAKE («Модель»),
- ❖ с добавлением фонового коэффициента турбулентной теплопроводности/диффузии («Модель испр.»),
- ❖ по данным измерений на гидрологическом посту Давст («Станция»),
- ❖ и по данным восстановления температуры из спутниковых измерений («Спутник»).

Среднеквадратичное отклонение среднемесячной температуры по данным спутниковых измерений для разных месяцев находится в диапазоне 0,0-1,5 °С, в модели 0,6-1,1 °С.

Разрушение ледяного покрова: ds – начало таяния, df – полное освобождение ото льда



Становление ледяного покрова: ds – начало ледостава, df – полное замерзание озера



В большинстве случаев по результатам моделирования (эксперимент Э3) наблюдается более поздний сход ледяного покрова и более раннее становление, чем по спутниковым данным

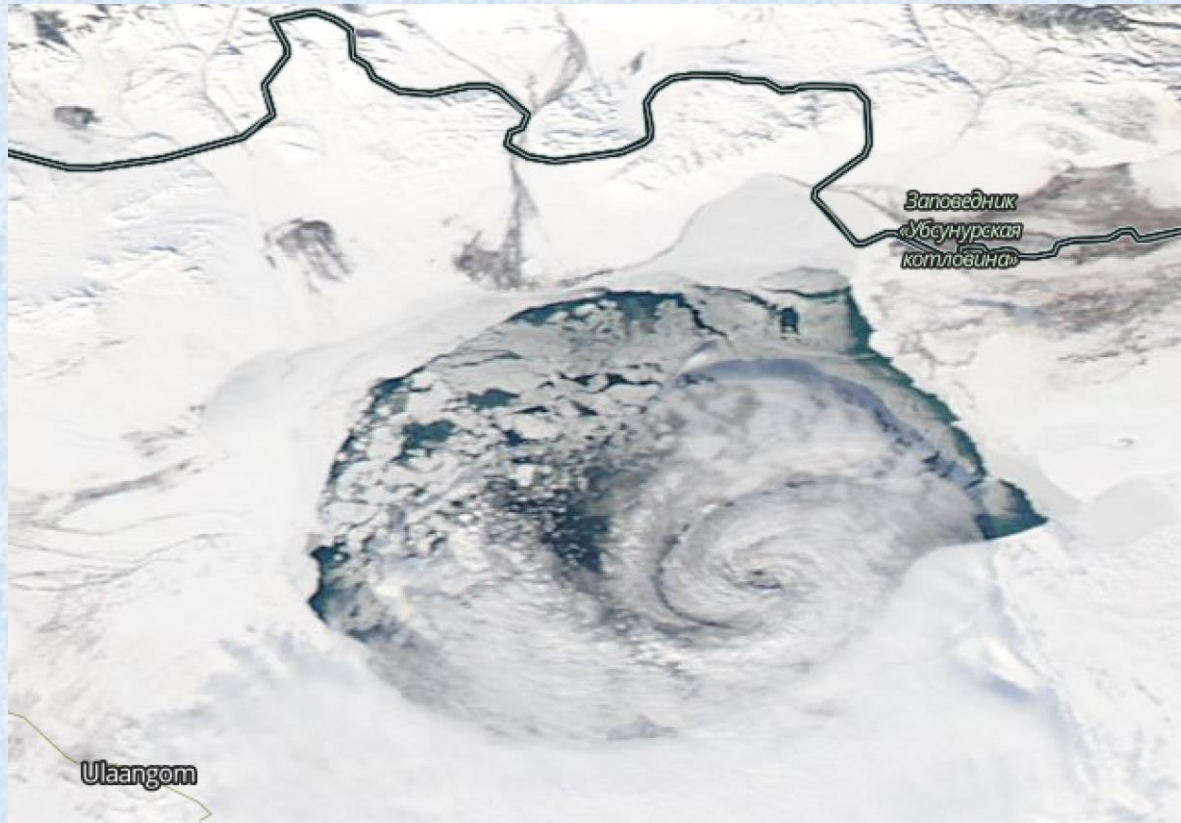
Причины более раннего освобождения ото льда



- 1) Лёд весной начинает таять от берегов, где глубина озера небольшая и радиационный прогрев быстрый.
- 2) Озеро покрывается трещинами по всей площади, через которые вода быстро нагревается, ускоряя разрушение льда. Более эффективный теплообмен через трещины, чем через большие участки открытой воды, исследован в Арктике (*Marcq and Weiss 2012*)
- 3) Более ранний сход снега в модели.

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



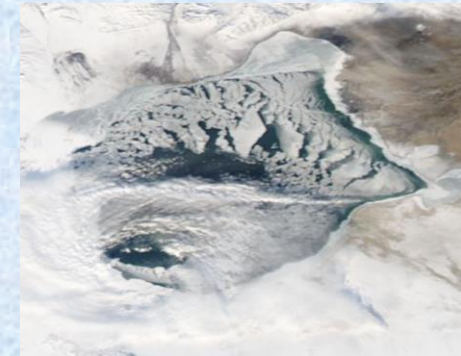
22 ноября 2000



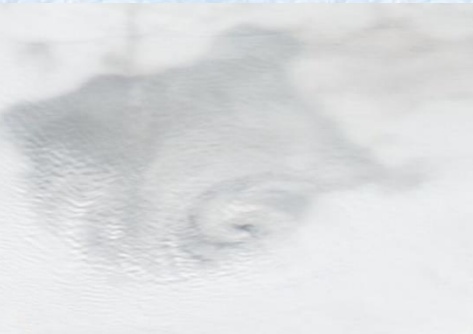
10 ноября 2004



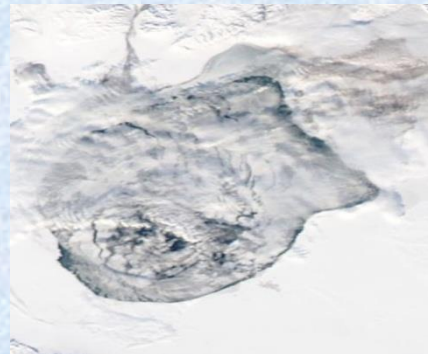
10 декабря 2004



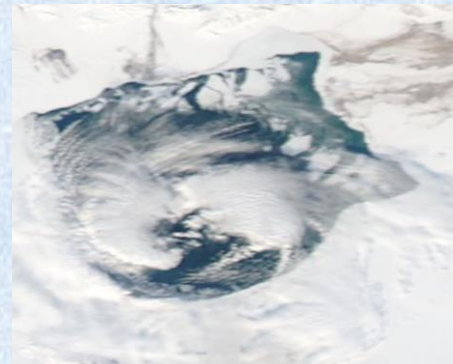
1 декабря 2006



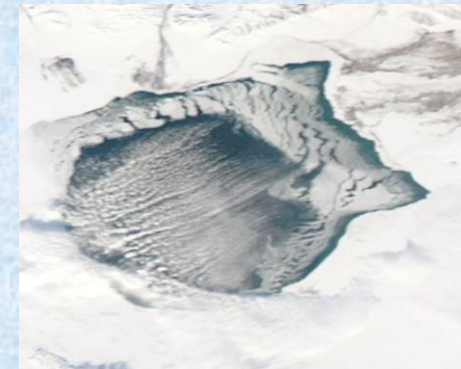
11 декабря 2006



29 ноября 2007



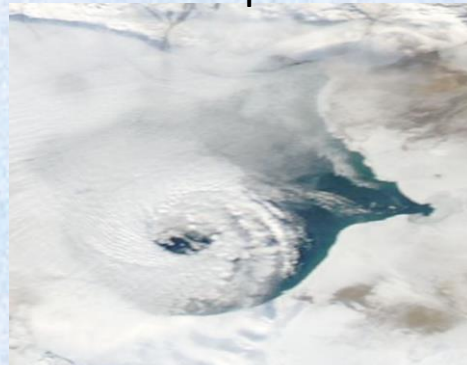
10 декабря 2007



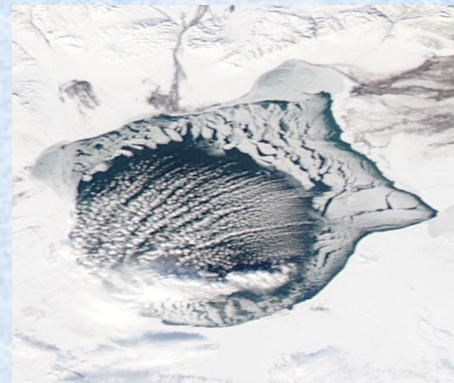
21 ноября 2009



29 ноября 2013



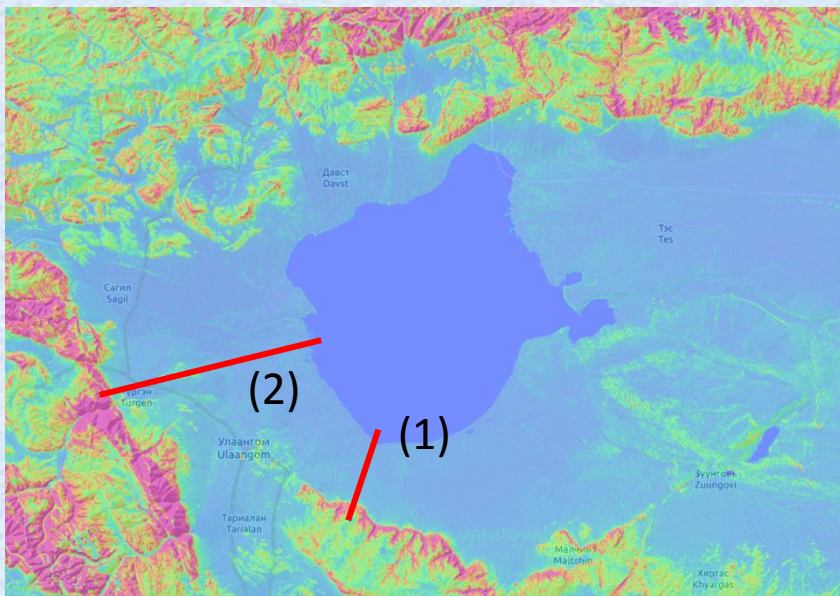
20 ноября 2016



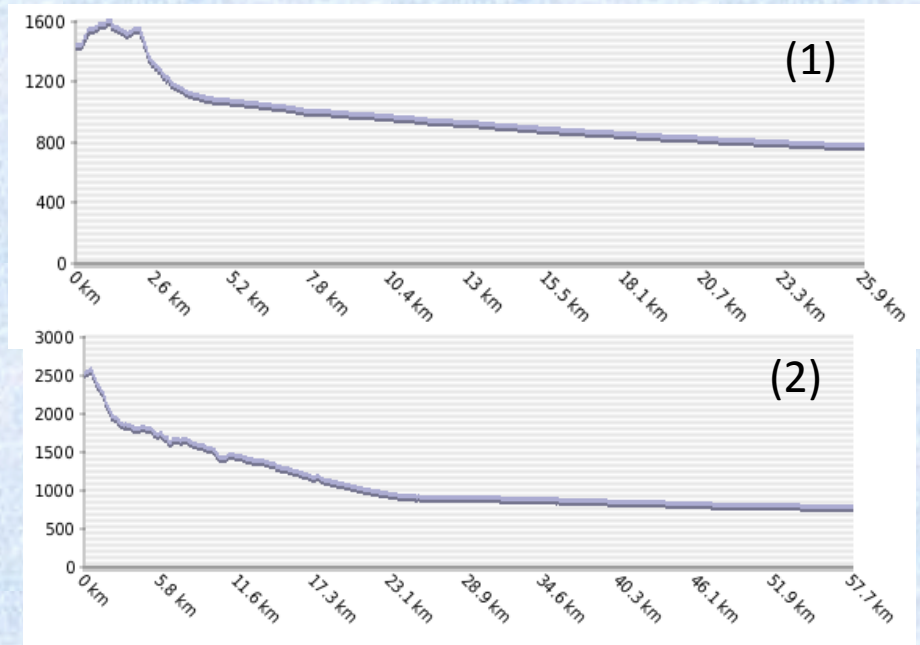
22 ноября 2016



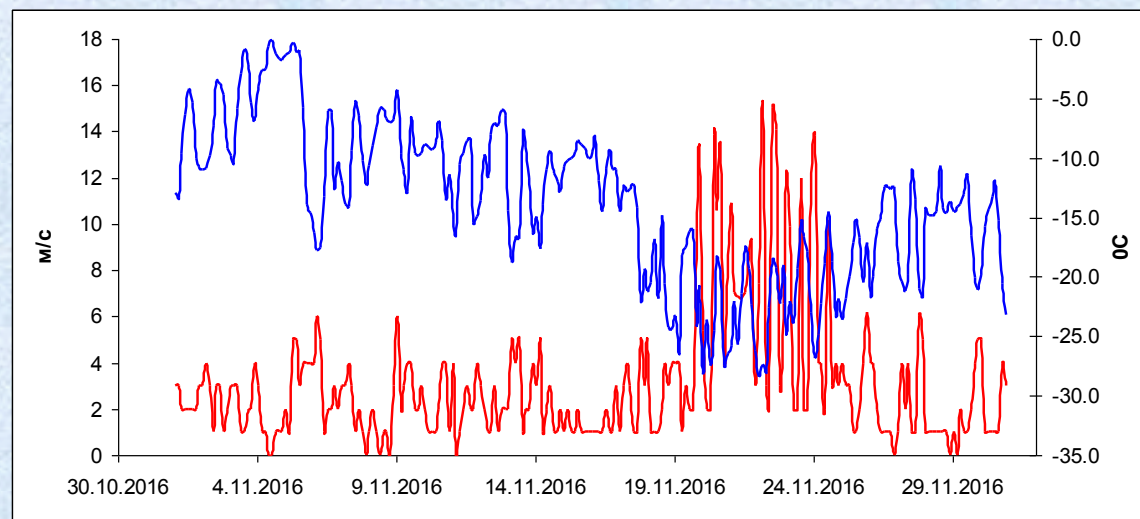
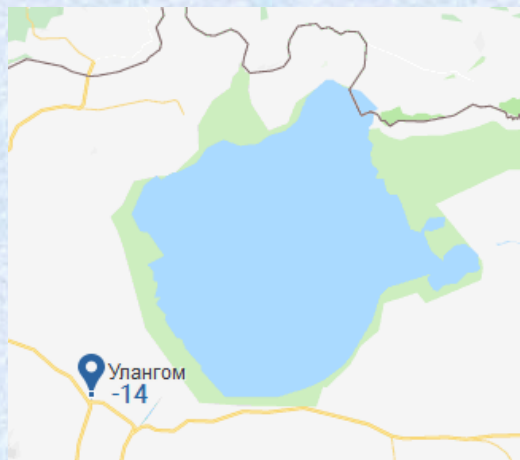
Рельеф Убсунурской котловины



Перепады высот рельефа

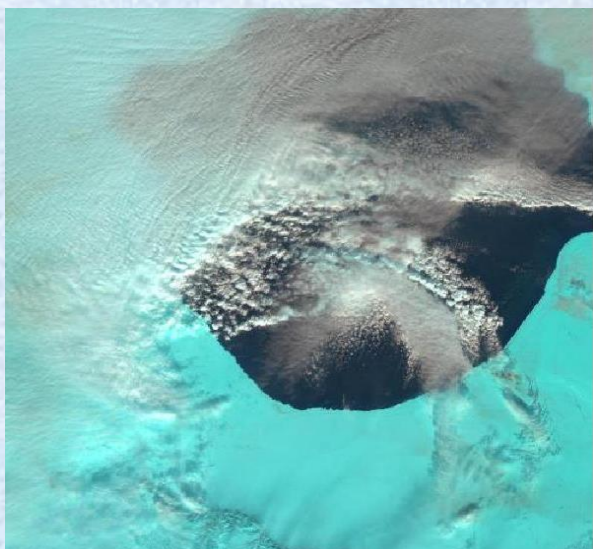


Температура воздуха и скорость ветра на станции Улангом в ноябре 2016 г.

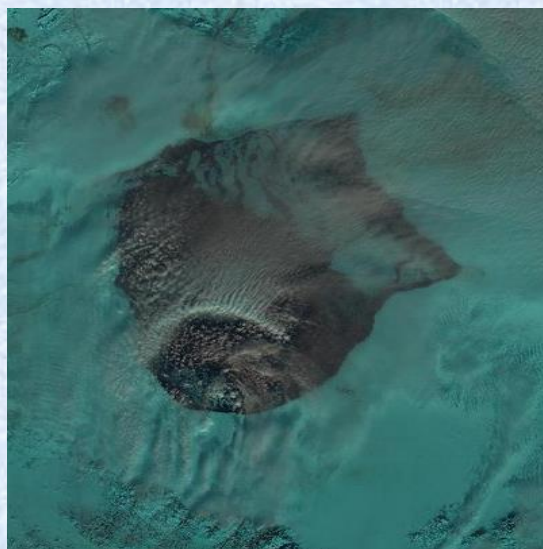


Формирование вихря происходит на фоне падения температуры воздуха и усиления ветра

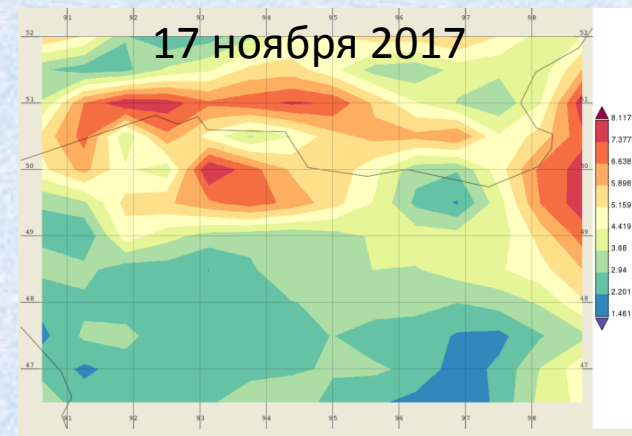
17 ноября 2017 sentinel 2a



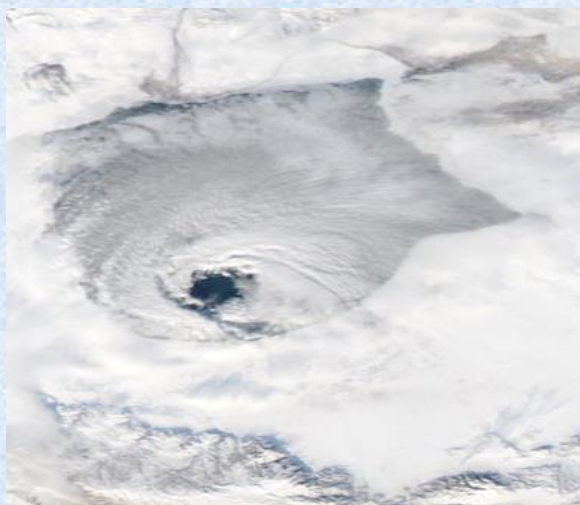
29 ноября 2017 г Landsat-8



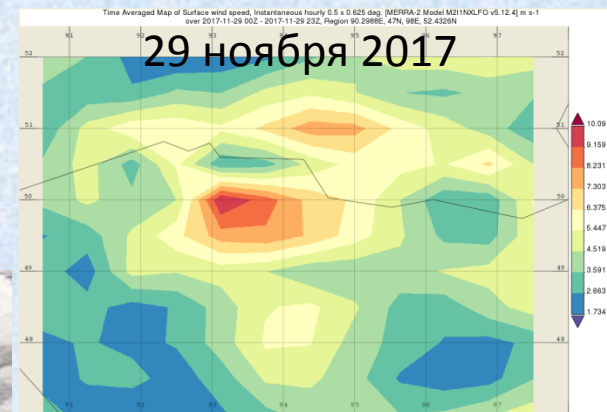
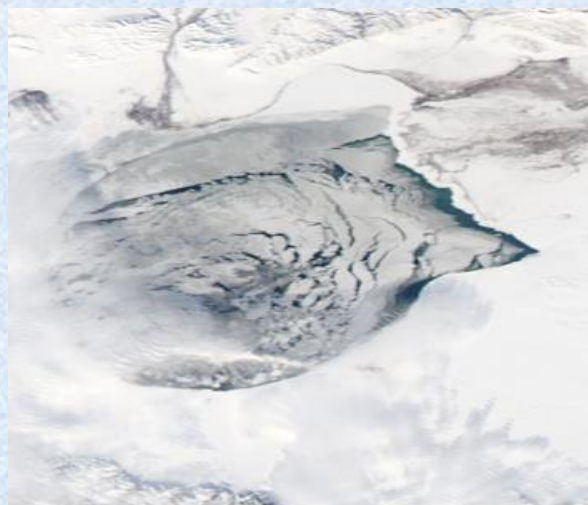
Скорость ветра, реанализ MERRA



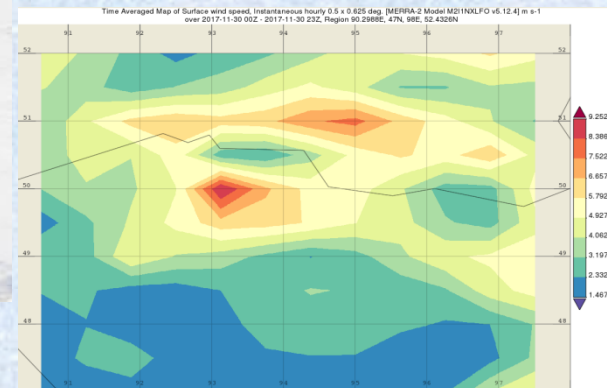
30 ноября 2017



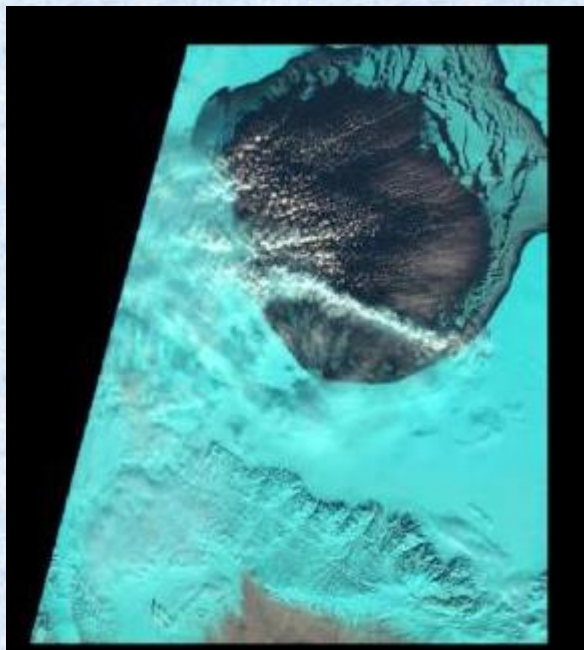
7 декабря 2017



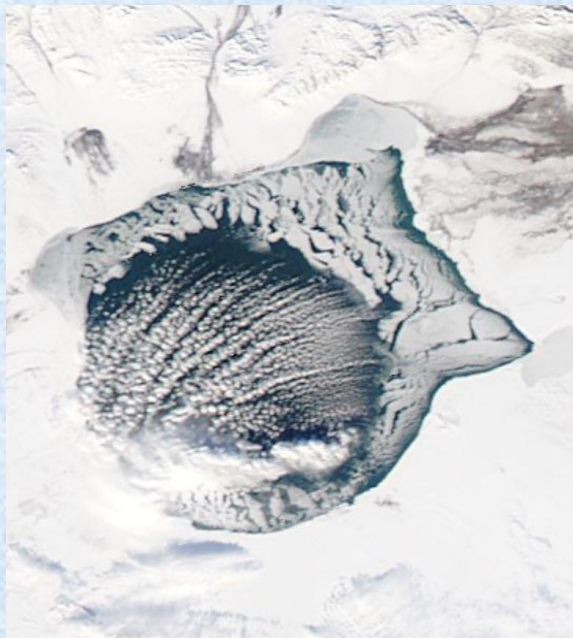
30 ноября 2017



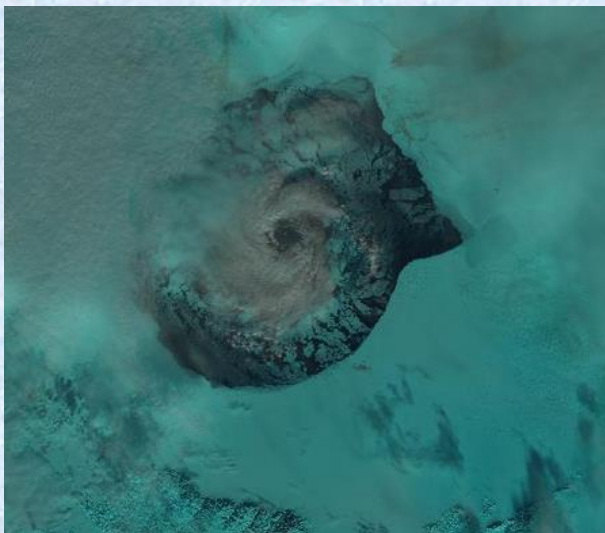
19 ноября 2016 sentinel 2a



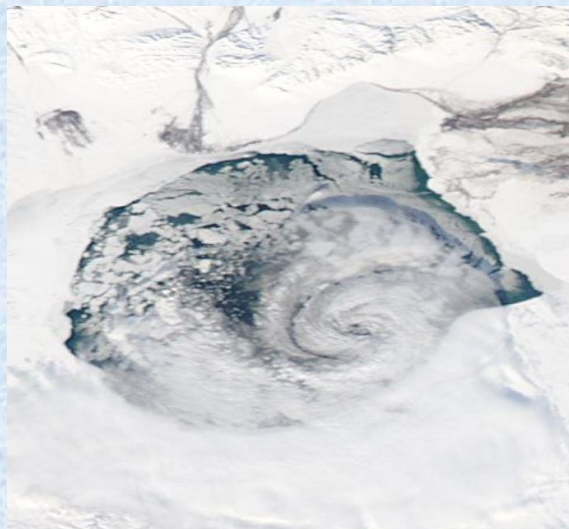
20 ноября 2016 MODIS 22 ноября 2016 sentinel 2a



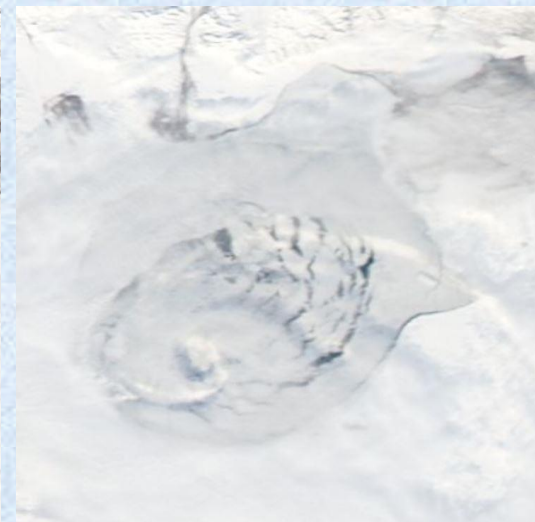
26 ноября 2016 LANDSAT-8



28 ноября 2016 MODIS

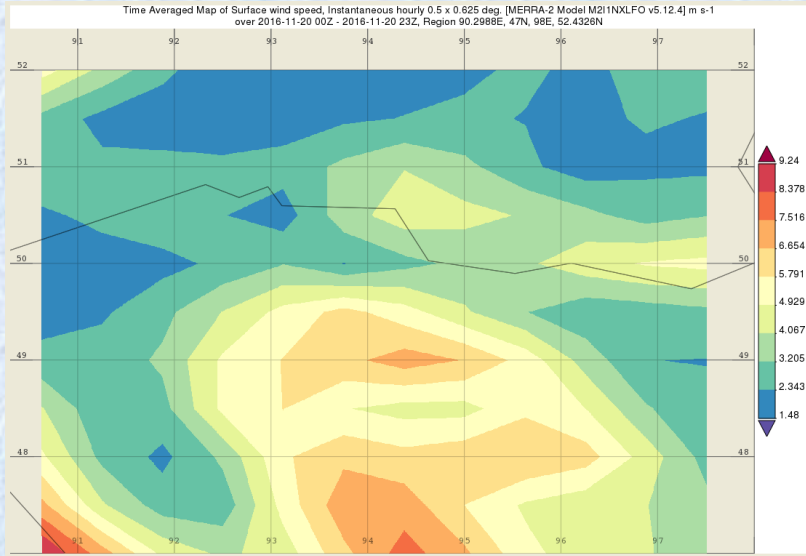


30 ноября 2016 MODIS

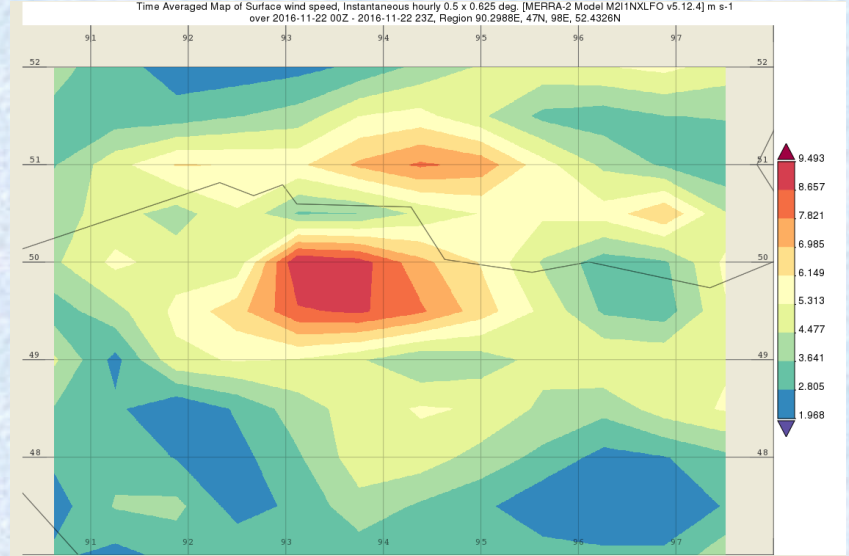


Скорость ветра, реанализ MERRA

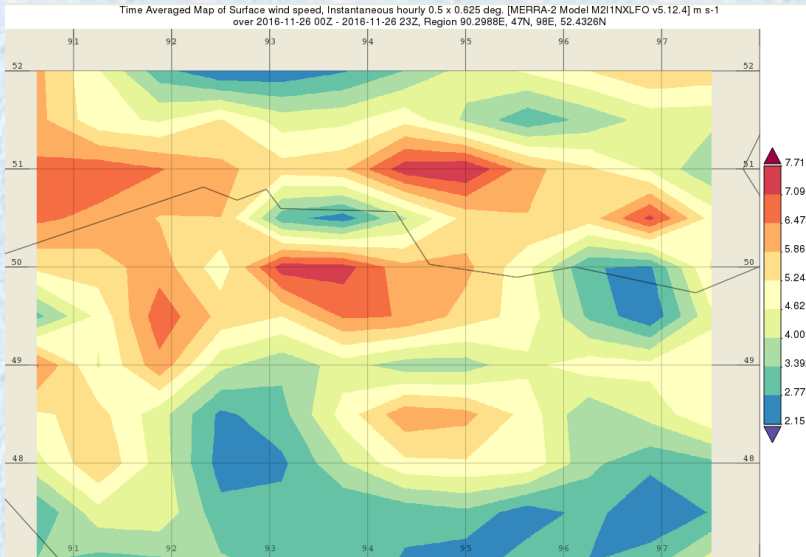
20 ноября 2016



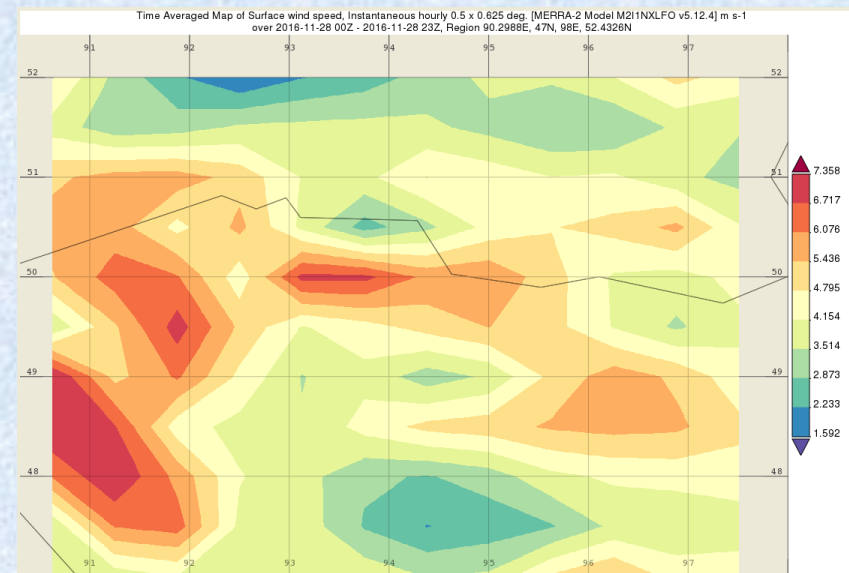
22 ноября 2016



26 ноября 2016



28 ноября 2016



Заключение

Причины сдвига сроков ледостава и схода льда в модели:

1. Недостаточное перемешивание в озере по вертикали в тёплое время года в модели со стандартным турбулентным замыканием $k-\varepsilon$ (проблема решается введением в модели дополнительного (фонового) коэффициента турбулентной теплопроводности/диффузии).
2. Разрушение тонкого ледяного покрова осенью за счёт ветрового воздействия в осенний период в результате появления мезомасштабного атмосферного вихря над озером, образующимся на фоне холодных вторжений с суши на относительно теплые озерные воды в период, предшествующий замерзанию.
3. Ускоренный нагрев водоёма весной вследствие наличия закраин и трещин
4. Мезомасштабный вихрь формируется при натекании холодных воздушных масс с горных массивов на западе и юге от озера. Вихрь хорошо виден на снимках ИК и видимого диапазона. Реанализ MERRA при существовании вихря показывает ветровую аномалию в районе озера, но дает явно заниженные скорости ветра. Истинную скорость ветра внутри вихря возможно установить с использованием мезомасштабного моделирования.