

**XVI Всероссийская Открытая конференция  
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**Оценка гидролого-климатических изменений в Арктике  
по данным спутникового микроволнового зондирования  
акваторий окраинных морей Северного Ледовитого  
океана и прилегающей тундры**

**Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н., Тихонов В.В., Боярский Д.А., Шарков  
Е.А., Печкин А.С., Железнова Е.В., Чубаренко Б.В.**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул  
Институт космических исследований РАН, Москва  
Московский физико-технический институт, Москва  
ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард  
Атлантическое отделение Института океанологии РАН, Калининград*

## Актуальность

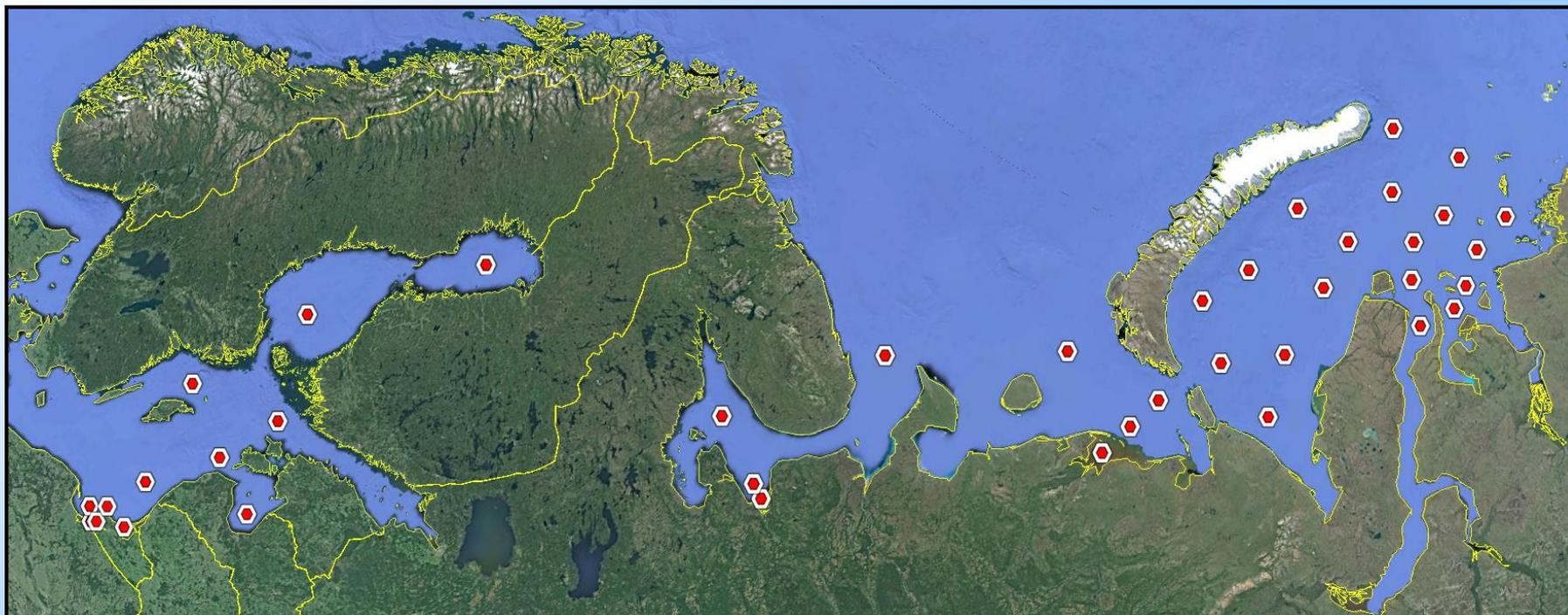
Потепление Арктики влечет за собой гидрологические и климатические изменения, которые проявляются в сокращении площадей ледового покрова, интенсивном таянии ледников и полярных шапок, уменьшении количества и суммарной площади термокарстовых озер, более раннем оттаивании и более позднем замерзании тундры.

*Karlsson J.M., Jaramillo F., Destouni G. Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost areas // Journal of Hydrology, October 2015, Vol. 529, Part 1, PP. 134-145. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.005*

Детальное изучение современных гидролого-климатических изменений необходимо для возможности надежного прогнозирования возникающих опасных гидрологических и метеорологических явлений. Оперативная информация о гидрологических реакциях на климатические изменения в Арктическом регионе имеет решающее значение при планировании мероприятий по защите окружающей среды и адаптации общества к изменяющимся условиям жизнедеятельности и может быть получена на основе использования всепогодных микроволновых методов дистанционного зондирования.

*Poursanidis D., Chrysoulakis N. Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions // Remote Sensing Applications: Society and Environment, April 2017, Vol.6, PP. 25-38. DOI: 10.1016/j.rsase.2017.02.001*

**Объект исследования:** акватории Балтийского, Белого, Печорского, Карского морей



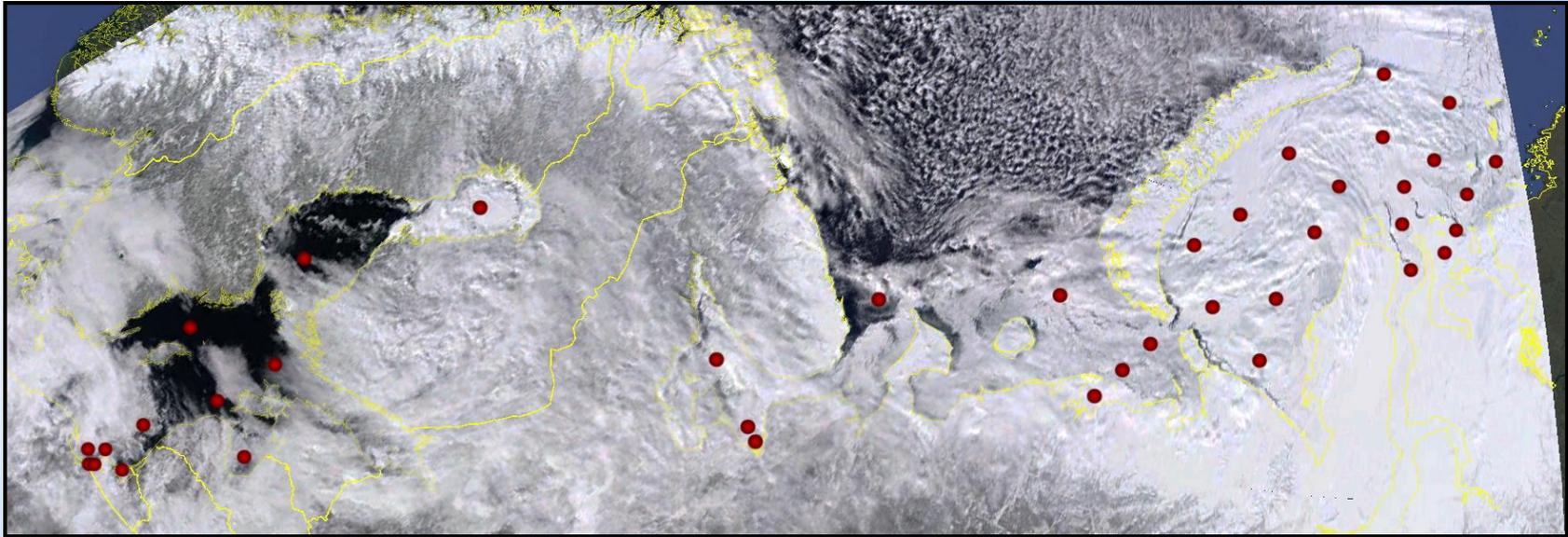
**Методология исследований** основывается на комплексном подходе, включающем обработку спутниковых данных, полевые и лабораторные измерения.

### ***Данные дистанционного зондирования***

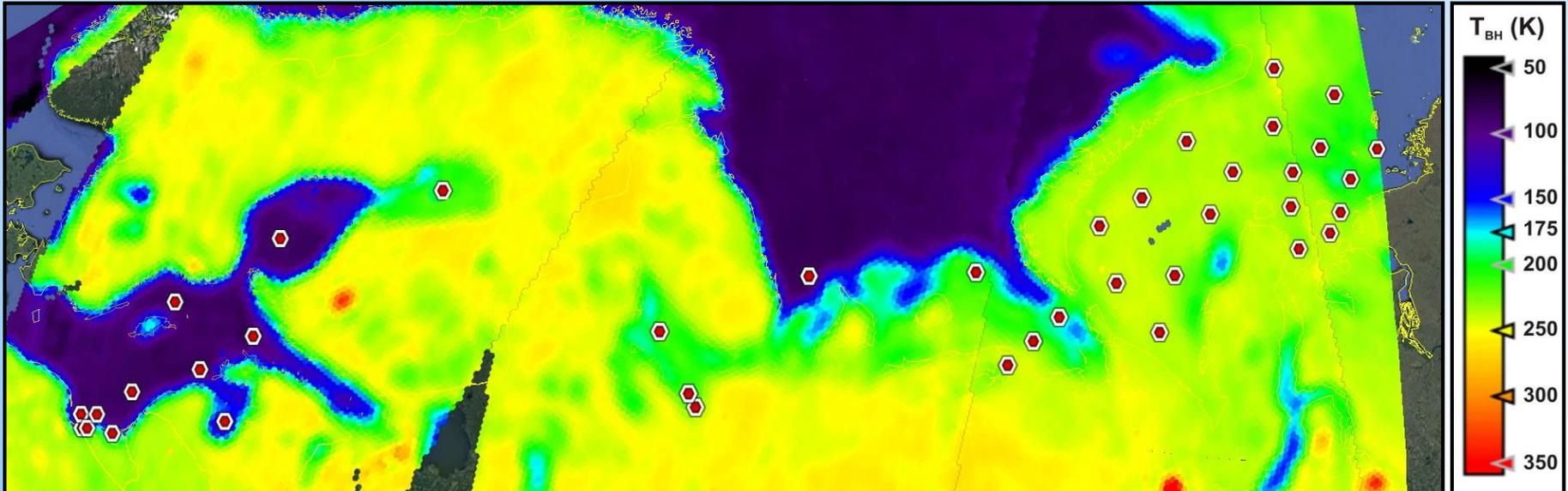
Оптический диапазон: **MODIS (Aqua, Terra)**

Микроволновый диапазон (1.41 ГГц): **MIRAS (SMOS)**, продукт L1C: пространственное распределение радияркостных температур подстилающей поверхности

2018.03.22: MODIS / Terra (worldview.earthdata.nasa.gov)



2018.03.22: MIRAS / SMOS

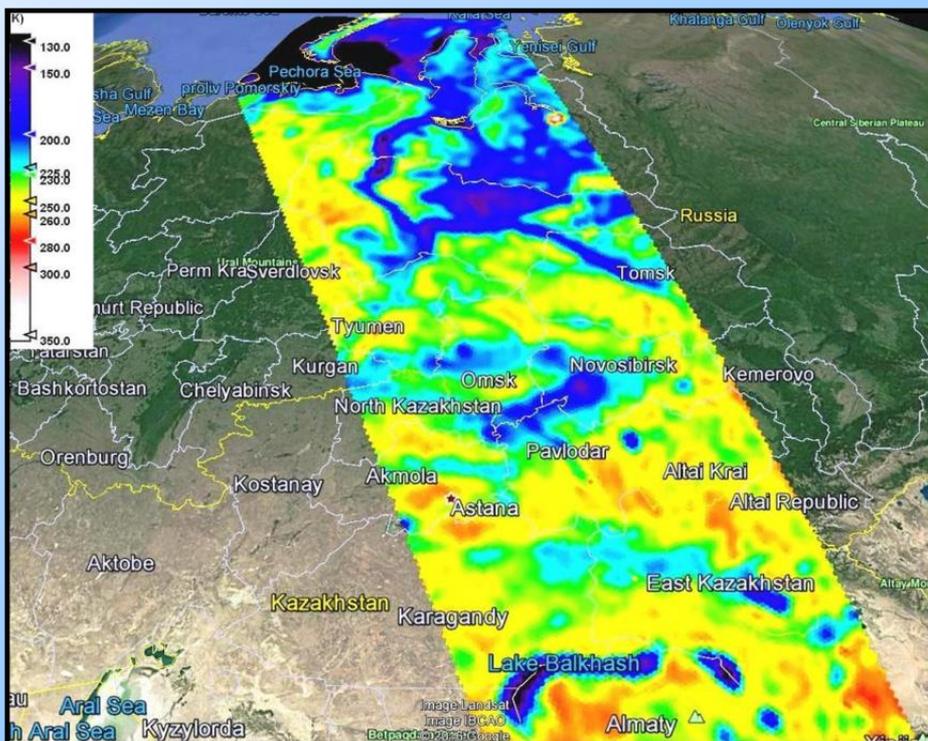
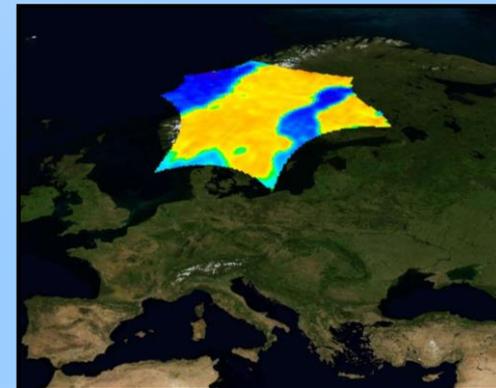


# Проект SMOS Европейского Космического Агентства



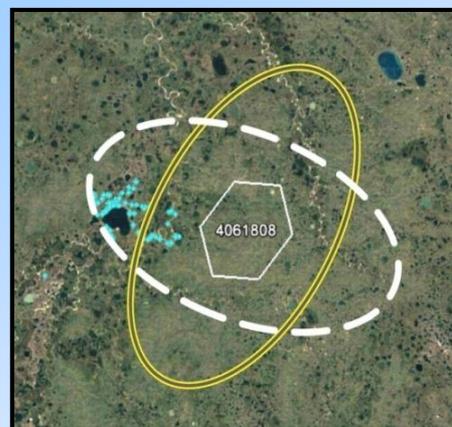
## Поляризационный 2-D интерферометр MIRAS

Период активности:	с 02.11.2009
Рабочая частота:	1400-1427 МГц
Высота орбиты:	~766 км
Наклонение орбиты:	98.449°
Период повторения орбиты:	23 суток
Период повторного посещения:	72 часа
Ширина полосы обзора:	890 км
Пространственное разрешение:	30-50 км
Радиометрическая точность:	2.5-5 К



**Продукт L1C.** Значения радиояркостных температур  $T_B$  с погрешностью от  $\pm 3$  К в центре до  $\pm 7$  К на краях полосы обзора.

**Продукты L2SM и L2OS.** Значения влажности почвы и солености воды.



**Продукты SMOS** привязаны к гексагональной геодезической сетке **DGG ISEA 4N9**, состоящей из 2621442 ячеек площадью  $\sim 200$  км<sup>2</sup>.

## К расчету радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности

Основными радиоизлучательными характеристиками однородной подстилающей поверхности являются радиояркость температура  $T_B$  и коэффициент излучения  $\chi$ , связанные между собой соотношением:

$$T_B = \chi \cdot T_{ef}$$

$$T_{ef} = T_0 + \int_0^{\infty} \frac{dT}{dz} \exp \left[ - \int_0^{\infty} \gamma(z') dz' \right] dz$$

– эффективная температура поверхности в скин-слое толщиной  $L_{ef} = \lambda / (4\pi \sqrt{|\varepsilon|} \operatorname{tg} \delta)$

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon' - \sin^2 \theta}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - \sin^2 \theta} \right)^2} - 1 \right]$$

– погонный коэффициент поглощения по мощности

$$|\varepsilon| = \varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

– комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП),  
 $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$  – тангенс угла потерь,  
 $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая части КДП.

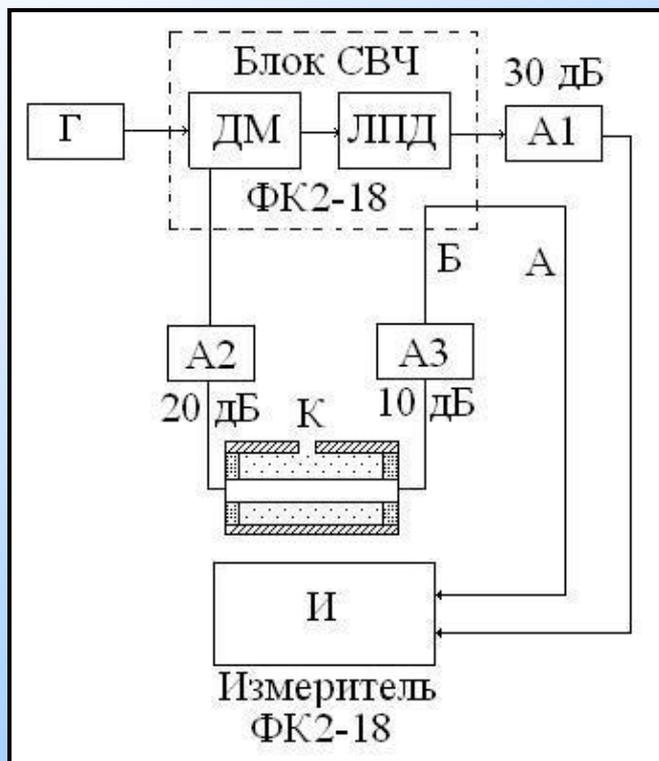
Излучение неоднородной поверхности складывается из излучения  $n$  отдельных составляющих её однородных участков с учетом долей их площади  $S_i$ :

$$T_B \cdot \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot S_i$$

## Полевые исследования

Отбор проб воды на тестовых участках, измерения температуры воды, измерения толщины ледяного покрова, химический анализ воды

## Лабораторные измерения



Получены эмпирические зависимости для образцов почвы и воды с более чем 200 тестовых площадок.

$$\chi(W, T) \quad \chi(Z, T)$$

Лабораторная установка мостового типа, созданная на основе измерителя разности фаз ФК2-18, позволяет измерять диэлектрические характеристики жидкостей и дисперсных смесей на частоте 1.413 ГГц.

В состав установки входят:

Г – генератор сигналов высокочастотный Г4-78 (1.16-1.78 ГГц),

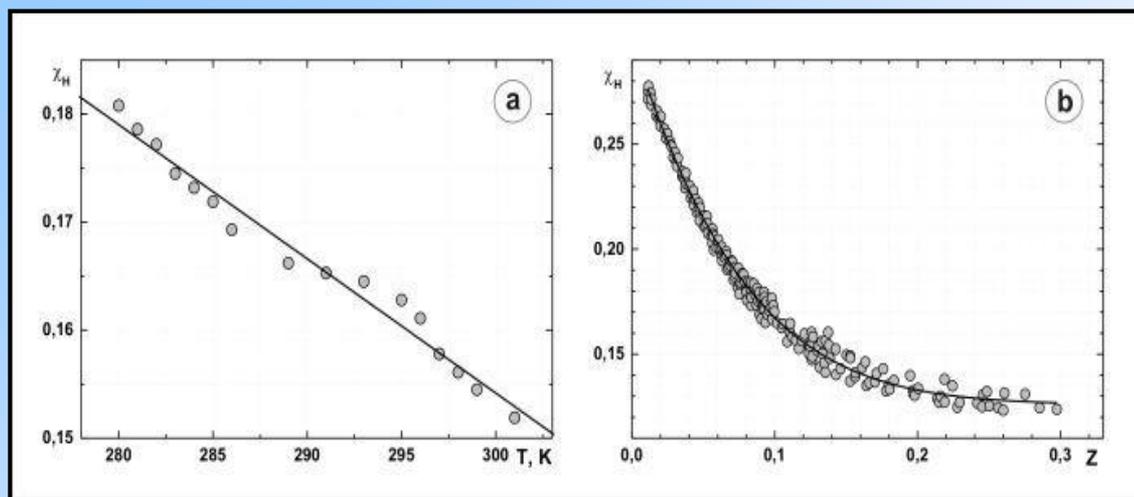
ДМ – делитель мощности согласованный,

ЛПД – линия переменной длины,

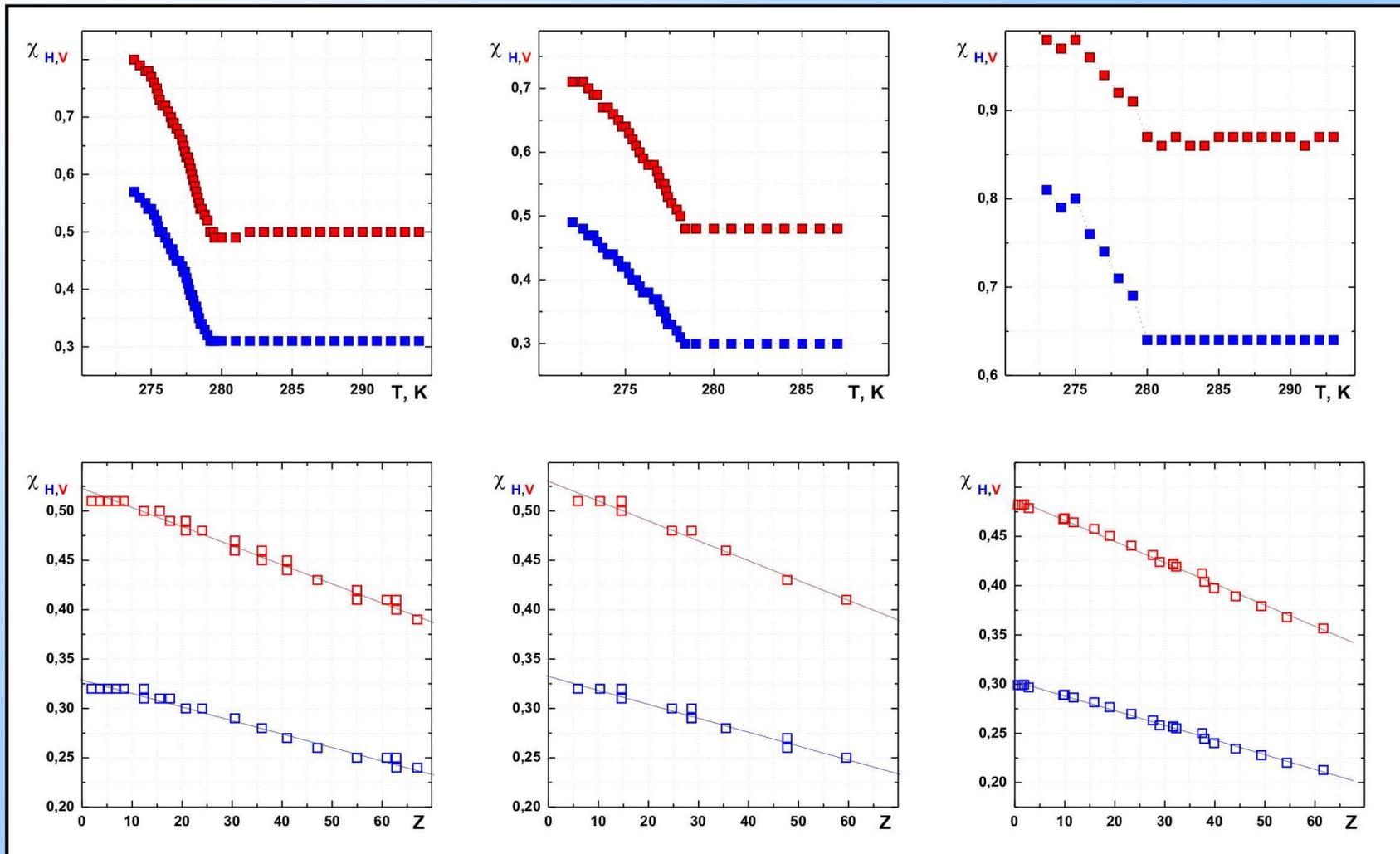
А1, А2, А3 – аттенюаторы согласующие коаксиальные,

И – измерительный блок фазометра,

К – контейнер для образца в виде коаксиального волновода.



# Результаты лабораторных исследований

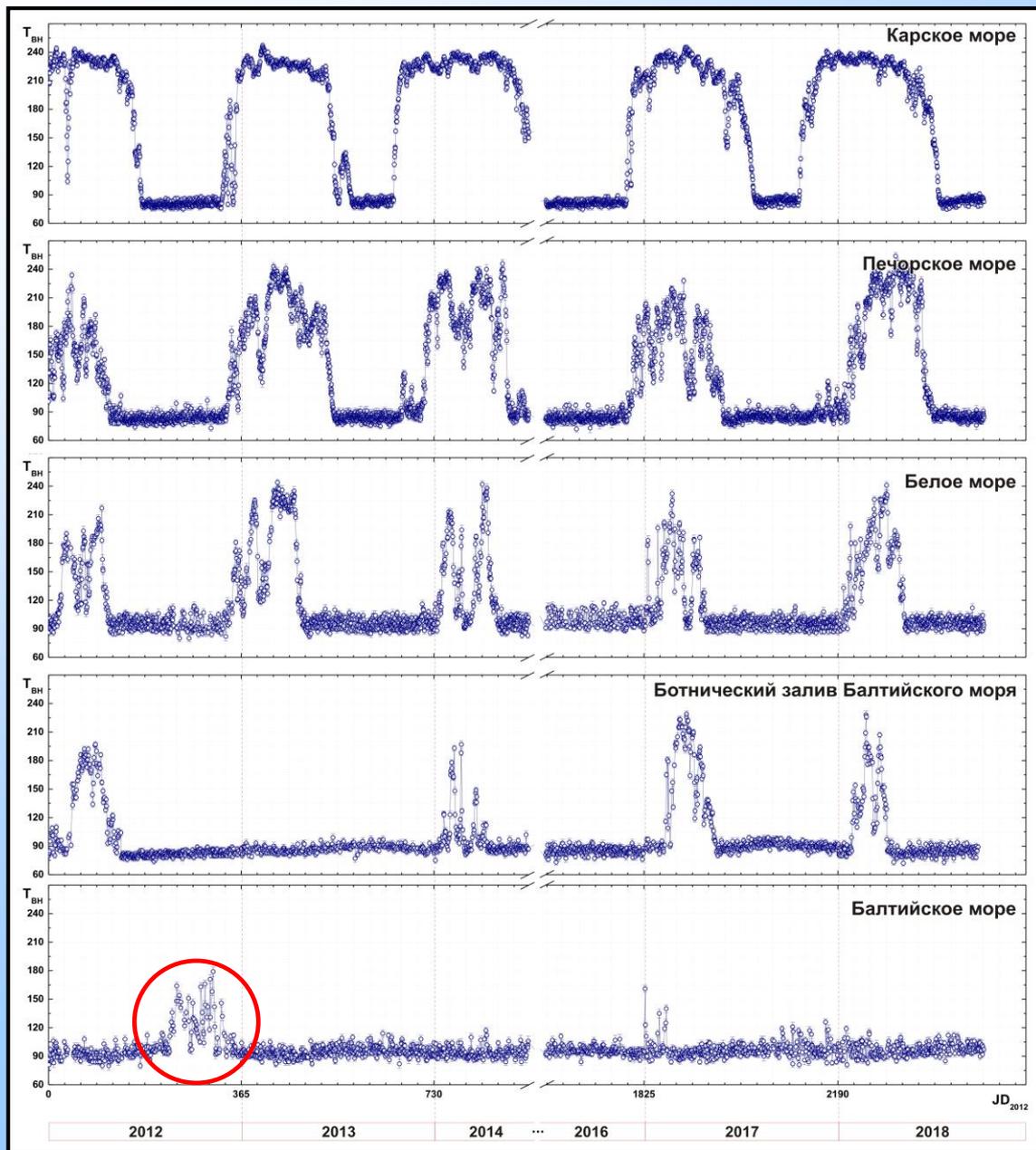


Балтийское море

Белое море

Карское море

# Динамика радиояркостных температур поверхности на тестовых участках



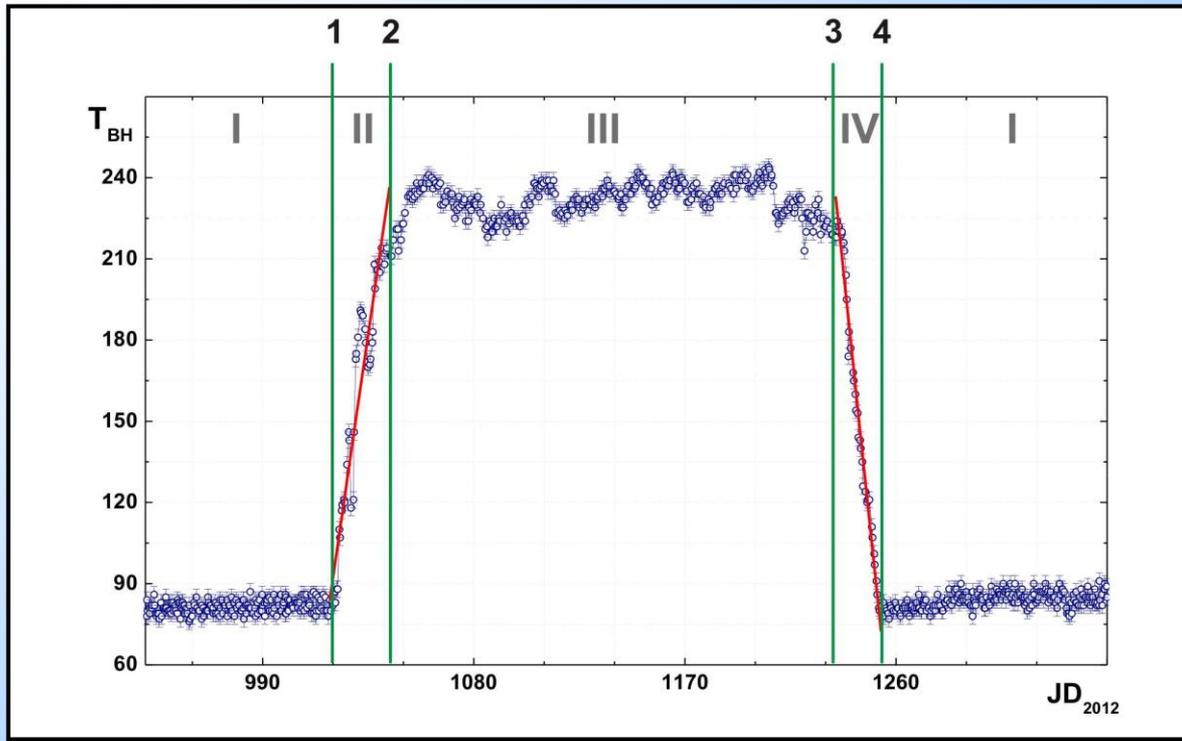
Различие радиояркостных температур обусловлено различием температуры и солёности воды, при наличии льда его толщиной и температурой. Продолжительность существования льда в разных точках в разные годы различна.

Вариации  $T_{В}$  достигают 100K. Обращают на себя внимание понижения  $T_{ВН}$  льда с толщиной большей скин-слоя до значений 150-160K, возможной причиной которых может быть частичное вскрытие ледового покрова, например, в результате ледокольной проводки нефтеналивных танкеров, поднятие солёной воды по трещинам в поверхностный слой льда и подтопление, наличие незамерзшей солёной воды в порах льда и фирна.

В период интенсивного таяния льда радиояростная температура водной поверхности с ледяным покровом нестабильна и характеризуется значительными перепадами.

Значения  $T_{ВН}$  понижаются с 230 до 80K,  $T_{ВВ}$  – с 260 до 130K. Наблюдаемые перепады достигают 60-70K и, возможно, связаны с возникновением снежиц на поверхности льда, разрушением ледяного покрова и появлением открытых участков воды.

# Сезонная динамика радиоярких температур акваторий



Радиоизлучение водной поверхности с установившимся ледяным покровом существенно зависит от солёности воды в диапазоне её изменения от 0 до 6 ‰.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_B = \left| \frac{T_B - T_{B,water}}{T_{B,water}} \right| > 10\%, \quad \text{for } JD = JD_1 - 1 \\ \delta T_B = \left| \frac{T_B - T_{B,water}}{T_{B,water}} \right| \leq 10\%, \quad \forall JD \in [JD_1; JD_1 + 10] \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_B = \left| \frac{T_B - T_{B,water}}{T_{B,water}} \right| \leq 10\%, \quad \text{for } JD = JD_2 - 1 \\ \delta T_B = \left| \frac{T_B - T_{B,water}}{T_{B,water}} \right| > 10\%, \quad \forall JD \in [JD_2; JD_2 + 30] \end{array} \right.$$

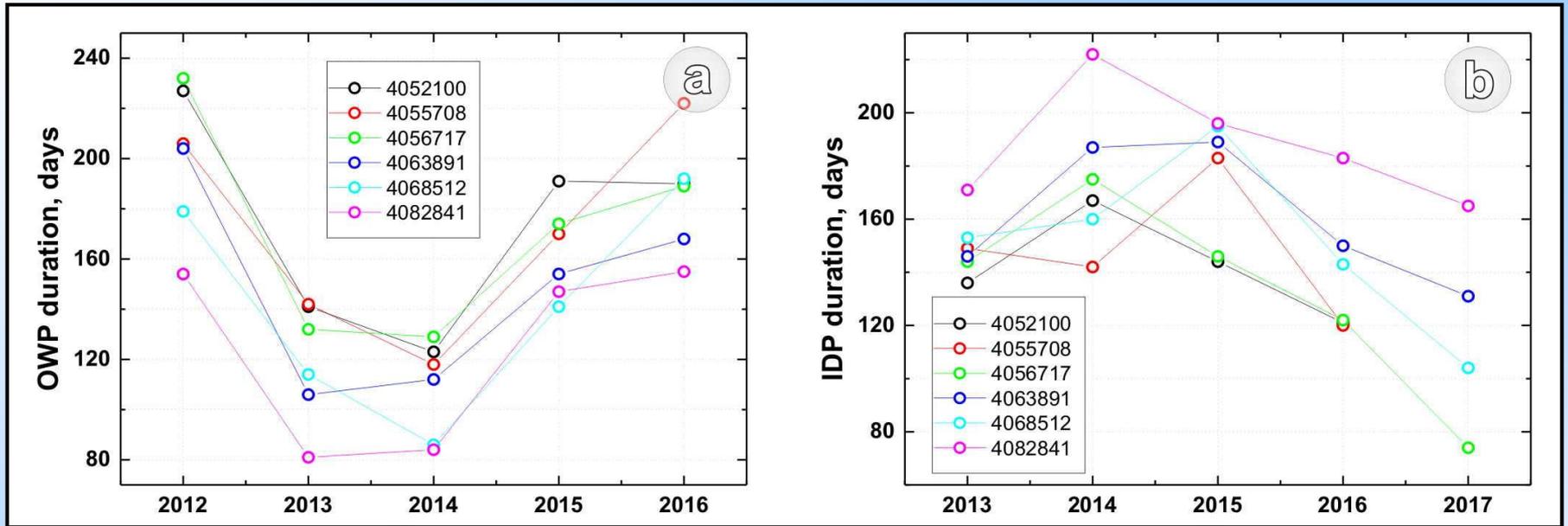
В годовой динамике радиоизлучения водной поверхности Карского моря можно выделить 4 фазы:

- Период открытой воды
- Период образования ледового покрова
- Период установившегося ледового покрова
- Период таяния ледового покрова

Каждая фаза характеризуется своей продолжительностью.

Фазы образования и таяния ледового покрова также могут характеризоваться скоростью изменения яркостной температуры.

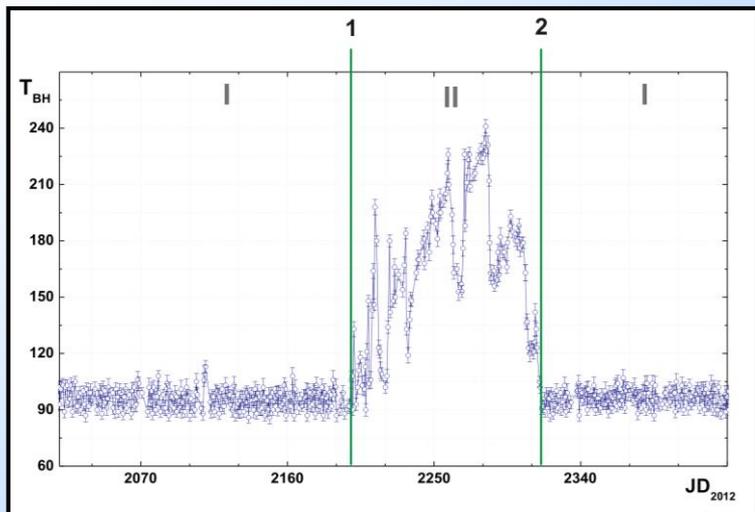
## Анализ гидролого-климатических изменений в Карском море



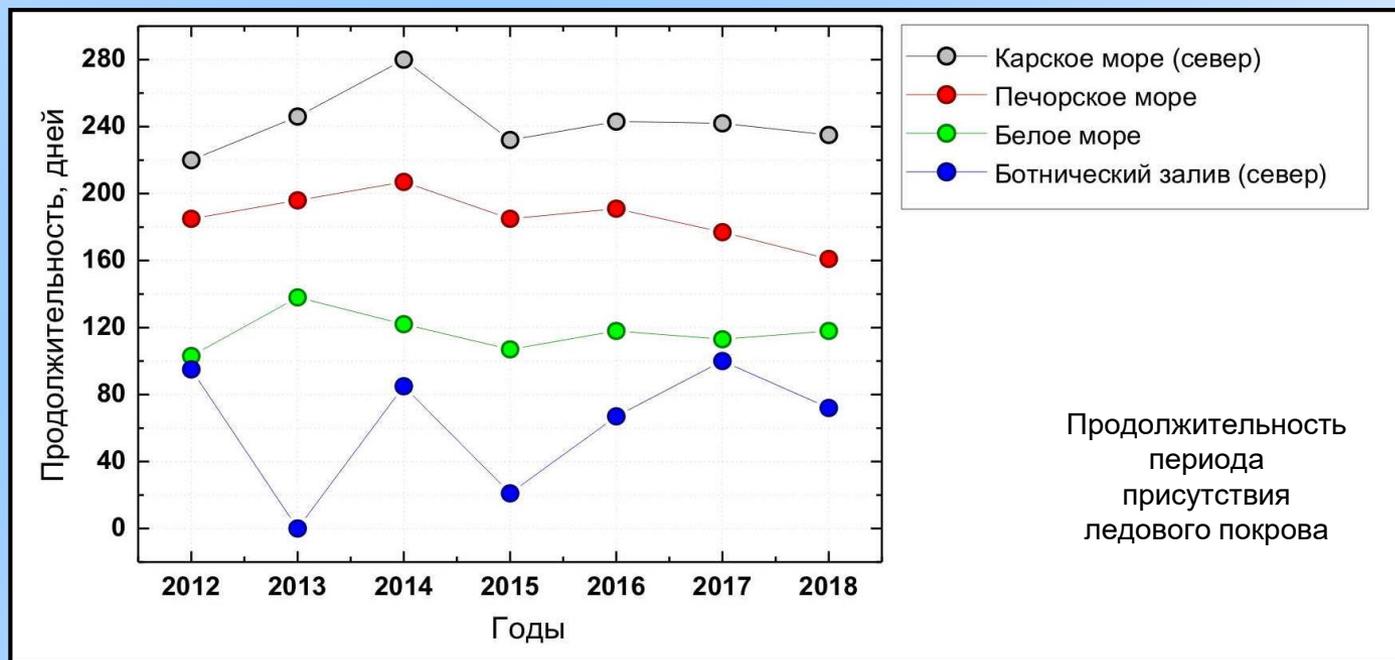
Продолжительность периода открытой воды

Продолжительность периода  
установившегося ледового покрова

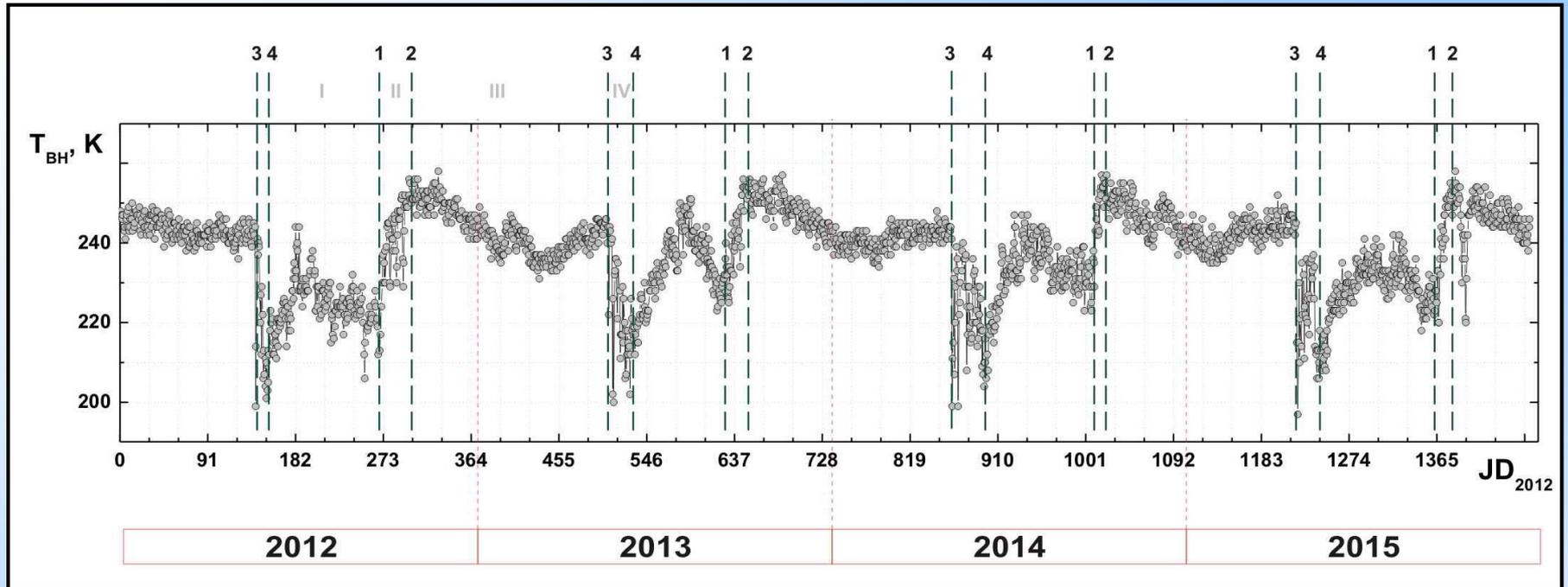
# Анализ гидролого-климатических изменений окраинных морей Северного Ледовитого океана



I – период открытой воды  
II - период присутствия ледового покрова

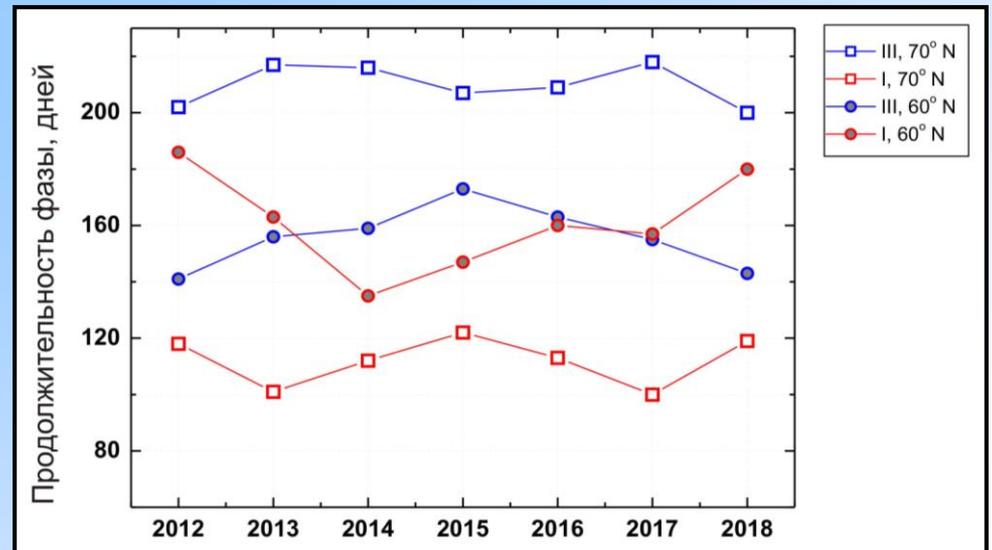


# Сезонная динамика радиоярких температур тундры



В годовой динамике радиоизлучения тундры наблюдаются характерные фазы замерзания (II) и оттаивания (IV) поверхности.

Продолжительности летней (I) и зимней (III) фаз имеют противоположные тренды.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- На основе анализа радиояркостных контрастов установлены пространственные и временные границы присутствия ледового покрова в акваториях окраинных морей Северного Ледовитого океана.
- В результате анализа временных рядов яркостных температур определена продолжительность периодов присутствия ледового покрова (ППЛП) на тестовых площадках.
- Продолжительности ППЛП испытывает вариации от года к году. Несмотря на двукратные отличия в абсолютных значениях, их тренды для Белого и Печорского морей, а также западных областей Карского моря качественно близки, коэффициент парной корреляции составляет 0.6 – 0.7.
- Тренды продолжительности ППЛП для большей части Карского моря имеют отличный вид, что может быть связано с экранированием влияния океанического течения архипелагом Новая Земля.

***Снимки SMOS получены в рамках проекта ESA № 4747  
«Remote mapping of Siberian saline soils».***

***Экспедиционное обследование территории выполнено  
при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 18-05-00753, 18-05-00440.***

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

