

Введение

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение



Платонов Н. Г., Соловьёва М. А., Рожнов В. В.  
ИПЭЭ РАН, г. Москва

# Ледовая фенология Каспийского моря

Международная научная конференция  
«Каспийский тюлень: индикатор состояния каспийской экосистемы»

Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН,  
г. Махачкала

12-14 ноября 2024 г.

# Введение

## Ледовый покров

Ледовые  
фенокарты

Цель работы

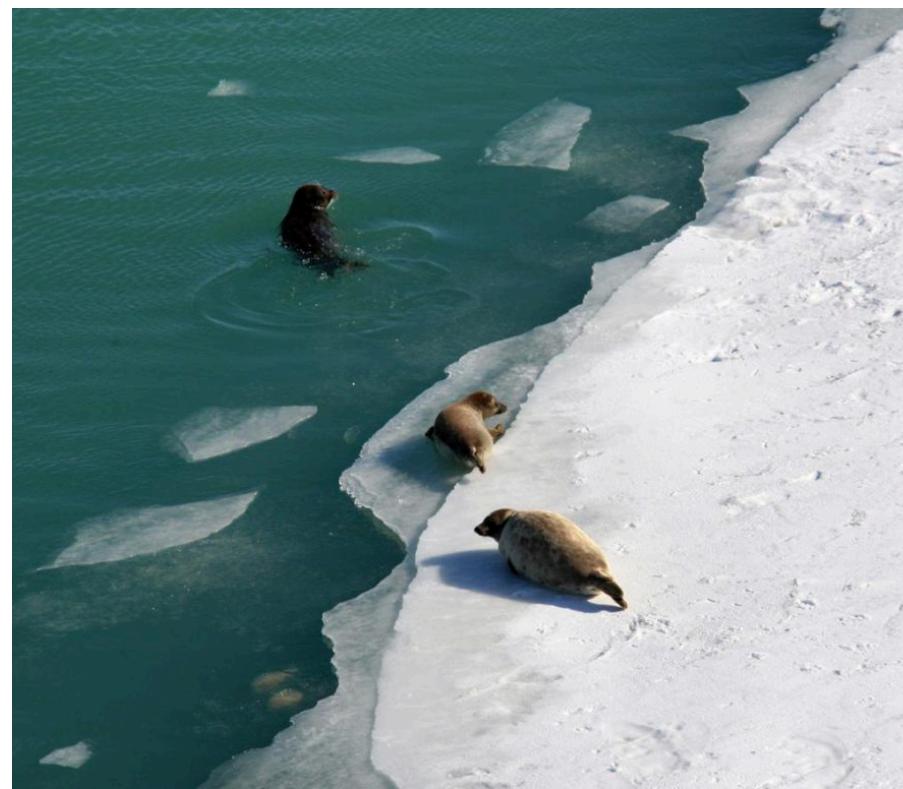
Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение



- Каспийский тюлень
  - Размножение (спаривание, лактация)
- Локальный климат
  - Положительные и отрицательные обратные связи
- Хозяйственная деятельность
  - Судоходство

# Введение

Ледовый покров

Ледовые  
фенокарты

Характеристики

Особенности

Цель работы

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

Единицы измерения – даты, дни с начала года

Сроки появления льда:

- Образование льда
- Импорт полей льда

Сроки исчезновения льда:

- Таяние льда
- Экспорт полей льда



# Введение

Ледовый покров

Ледовые  
фенокарты

Характеристики

Особенности

Цель работы

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

*Pros:*

- Ежедневные ледовые карты на протяжении нескольких месяцев отображаются на одной карте
- Карта оценки продолжительности ледового сезона в единицах «дни», «недели».

*Cons:*

- Сплощенность льда или категории ледового покрова исходных данных теряются.
- Неоднозначность использования параметров с единицами «дата» предикторами в математических моделях.



Введение	Цель
Ледовый покров	Оценить пространственно-временную динамику ледовой фенологии Каспийского моря
Ледовые фенокарты	
Цель работы	Задачи
Методы	<ul style="list-style-type: none"><li>• Оценить эффективность полученных результатов</li><li>• Выявить и обосновать причины изменений фенологических характеристик</li></ul>
Результаты	
Верификация	
Окружающая среда	
Заключение	



Введение

Методы

Данные

Обработка

Изотоническая  
регрессия

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

Временной ряд ежедневных явлений ледового покрова озер на основе данных AMSR-E and AMSR2 (Du Kimball et al., 2017) из NSIDC.



Н. Платонов

Ледовая фенология

Введение

Методы

Данные

Обработка •••

Изотоническая  
регрессия

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

- Преобразование из номинальной шкалы (категории льда) в интервальную (сплоченность льда)
- Заполнение пропусков в данных
  - Пространственная экстраполяция<sup>{1}</sup>
  - Временна́я экстраполяция
- Выделение района исследований (постобработка)



# Введение

# Методы

## Данные

## Обработка

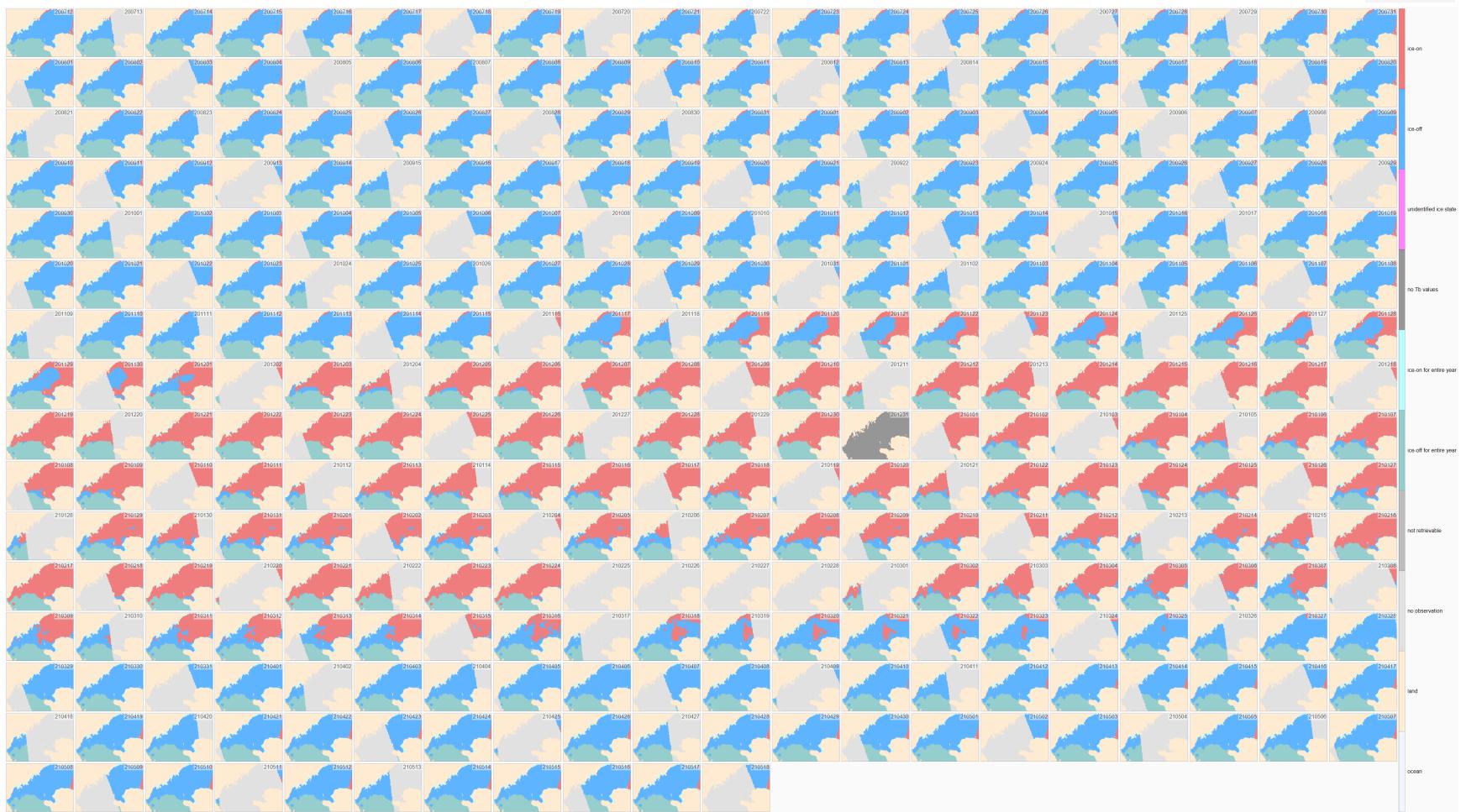
Изотоническая  
регрессия

## Результаты

## Верификация

## Окружающая среда

## Заключение



Номинальная шкала (категории льда)

Ср. с интервальной шкалой (сплочность льда).



Введение

Методы

Данные

Обработка

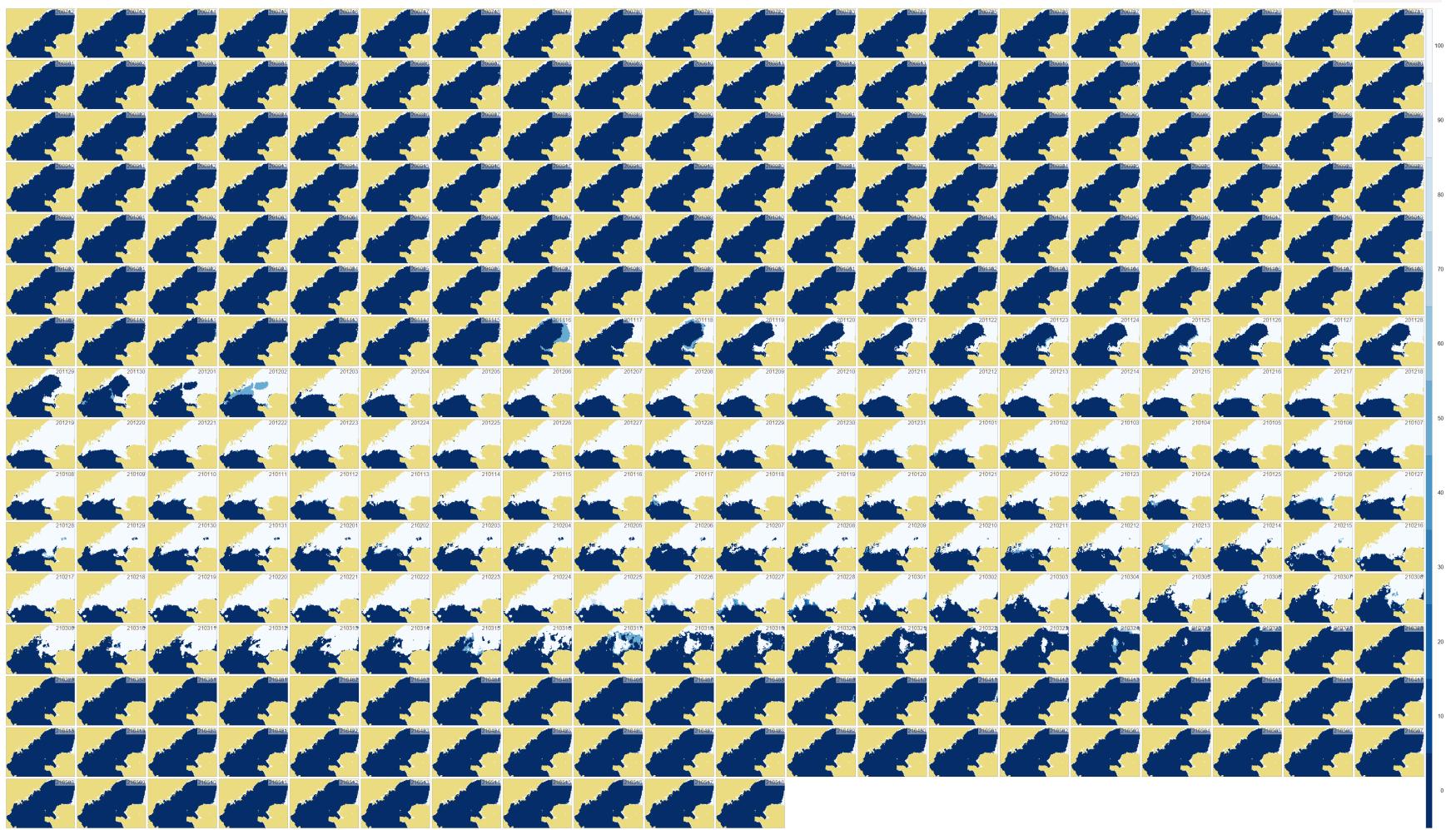
Изотоническая  
регрессия

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение



Интервальная шкала (сплоченность льда)  
Ср. с номинальной шкалой (категории льда).



Введение

Методы

Данные

Обработка

Изотоническая  
регрессия ••

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

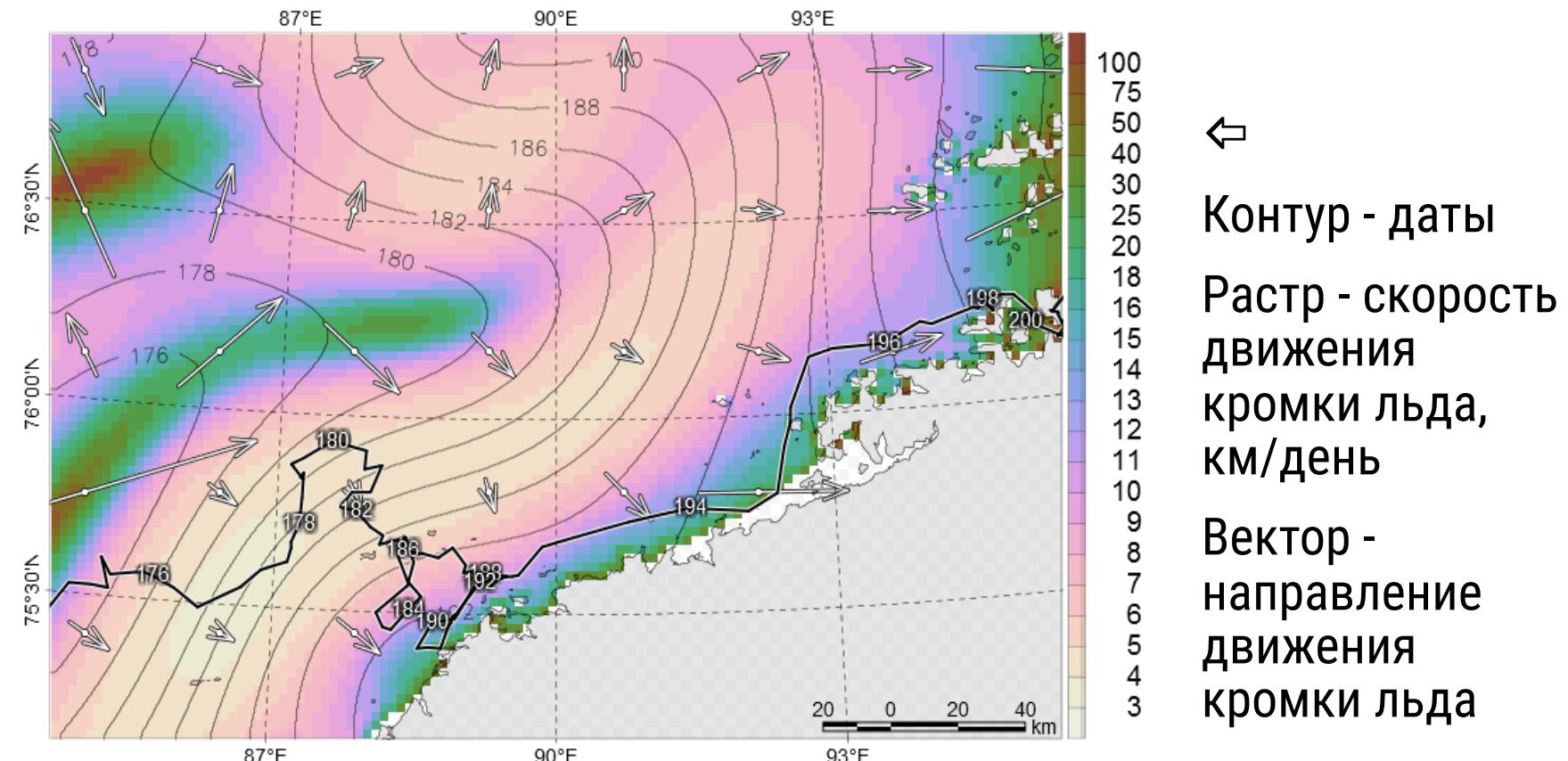


Н. Платонов  
Ледовая фенология

Применение унимодальной изотонической регрессии (Turner and Wollan, 1997) для аппроксимации временного ряда сплоченности морского льда.

Предшественник:

- Аппроксимация асимптотическими функциями Гомперца и несимметричной Гаусса (Рожнов Платонов et al., 2017).



Введение

Методы

Данные  
Обработка

Изотоническая  
регрессия •

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

## Сценарии аппроксимации временных рядов

- Мода (холм) – район краткосрочного присутствия льда (обычно для Каспийского моря)
- Неубывающая функция с двумя плато – период образования льда
- Невозрастающая функция с двумя плато – период исчезновения льда
- Инвертированная мода (впадина) – район краткосрочного периода открытой воды (не для Каспийского моря)

### Оценка сроков:

- Абсцисса пересечения линии изотонической регрессии с линией сплоченности 15% для всех сценариев

### Оценка качества:

- Сумма квадратов отклонений (как в линейной регрессии)

### Выбор сценария:

- Минимальная сумма квадратов отклонений.



# Введение

# Методы

# Результат

# Появление льда •

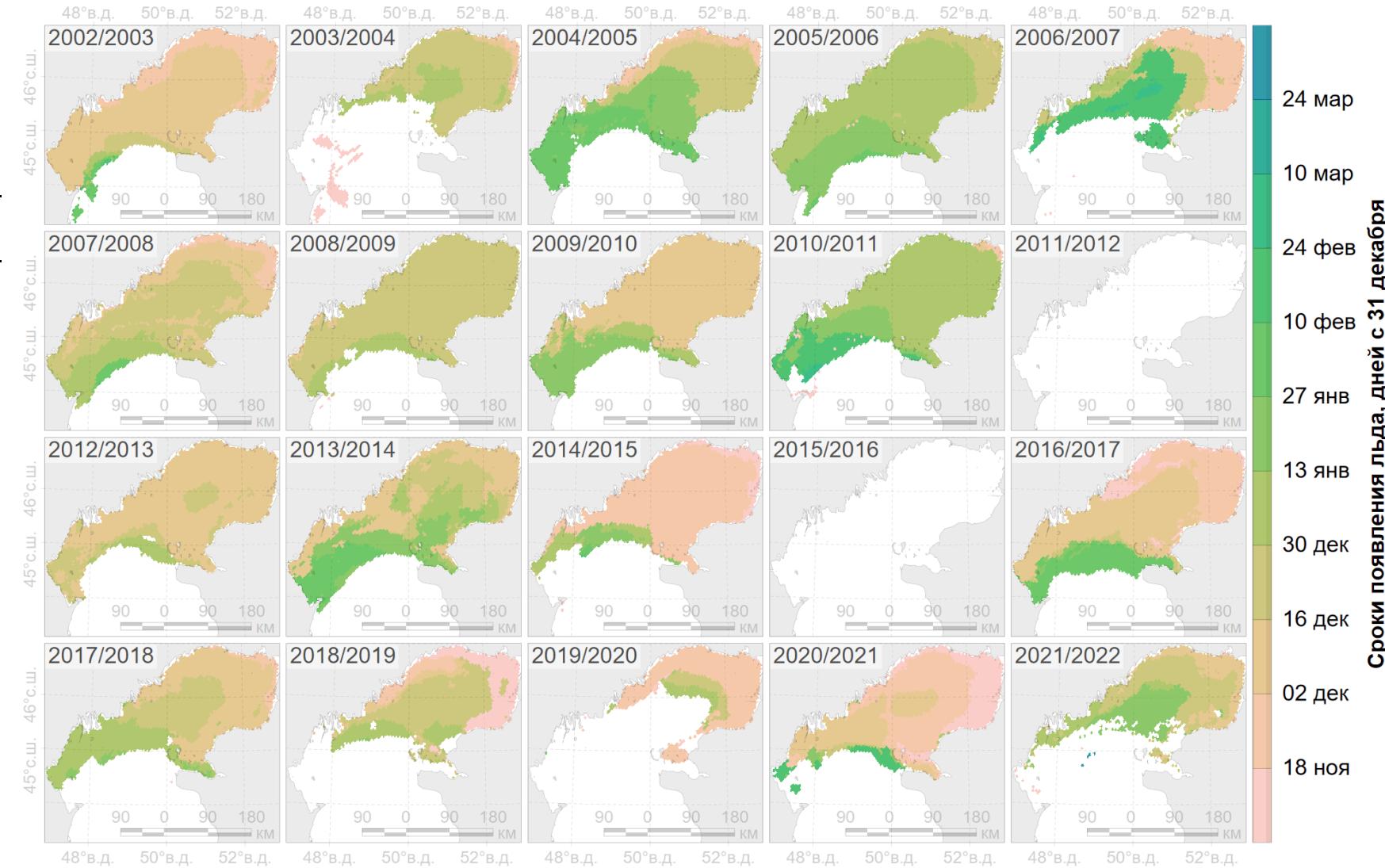
# Исчезновение льда

# Ледовый период

# Верификация

# Окружающая среда

# Заключение



# Введение

## Методы

## Результаты

### Появление льда •

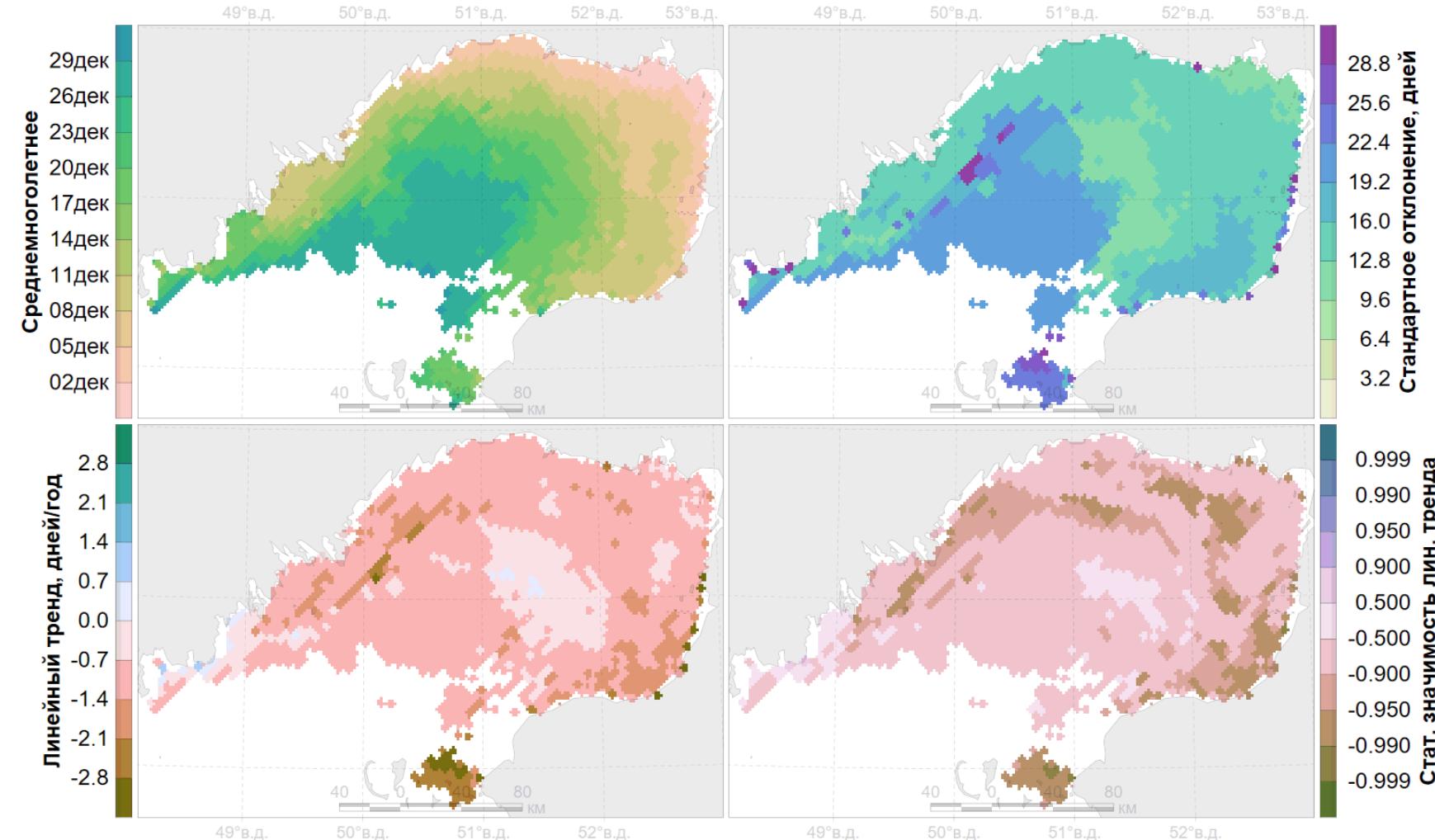
Исчезновение льда

Ледовый период

Верификация

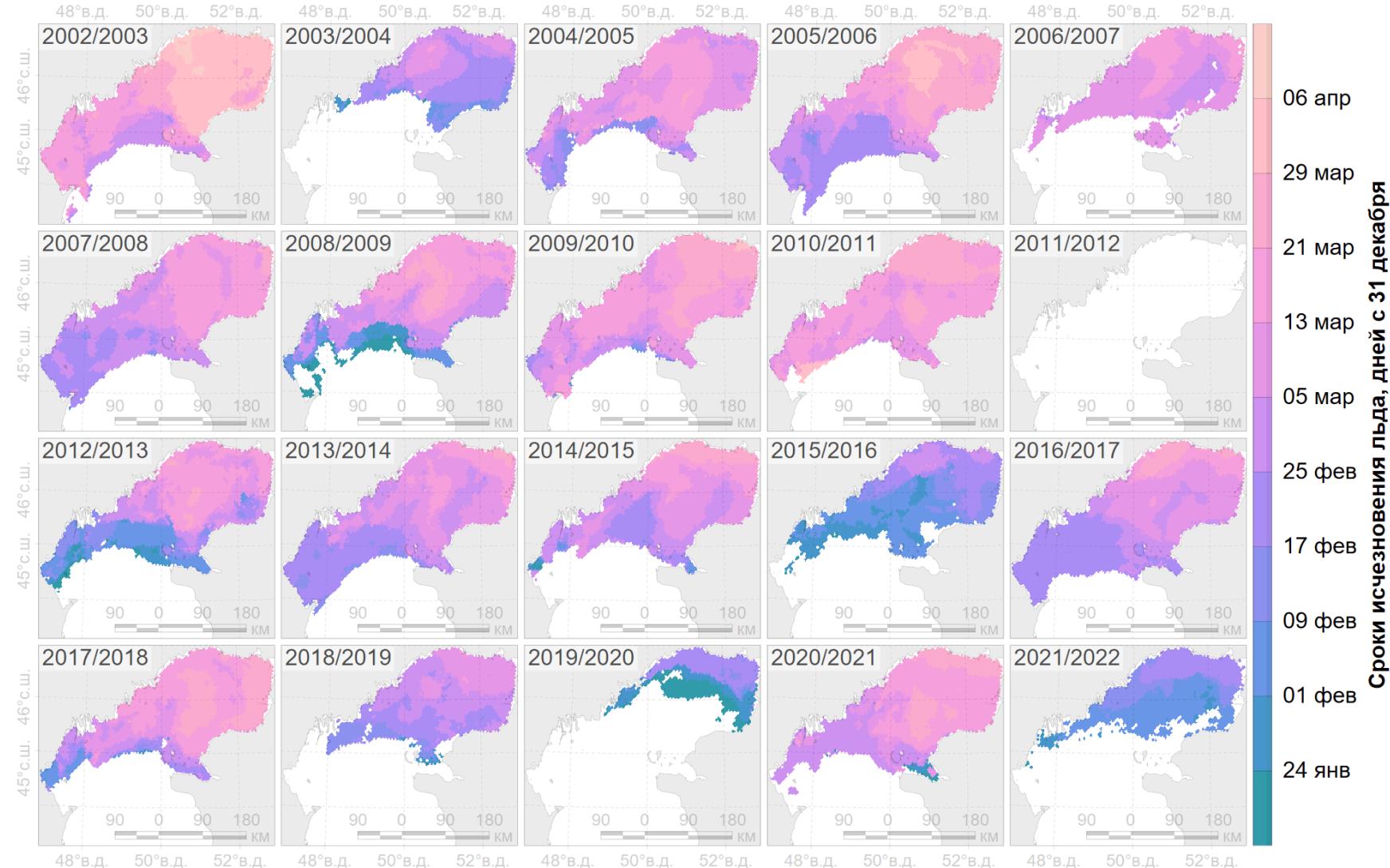
Окружающая среда

Заключение



Введение  
Методы  
**Результаты**  
Появление льда  
Исчезновение л...  
•

Ледовый период  
Верификация  
Окружающая среда  
Заключение



# Введение

## Методы

## Результаты

Появление льда

Исчезновение льда

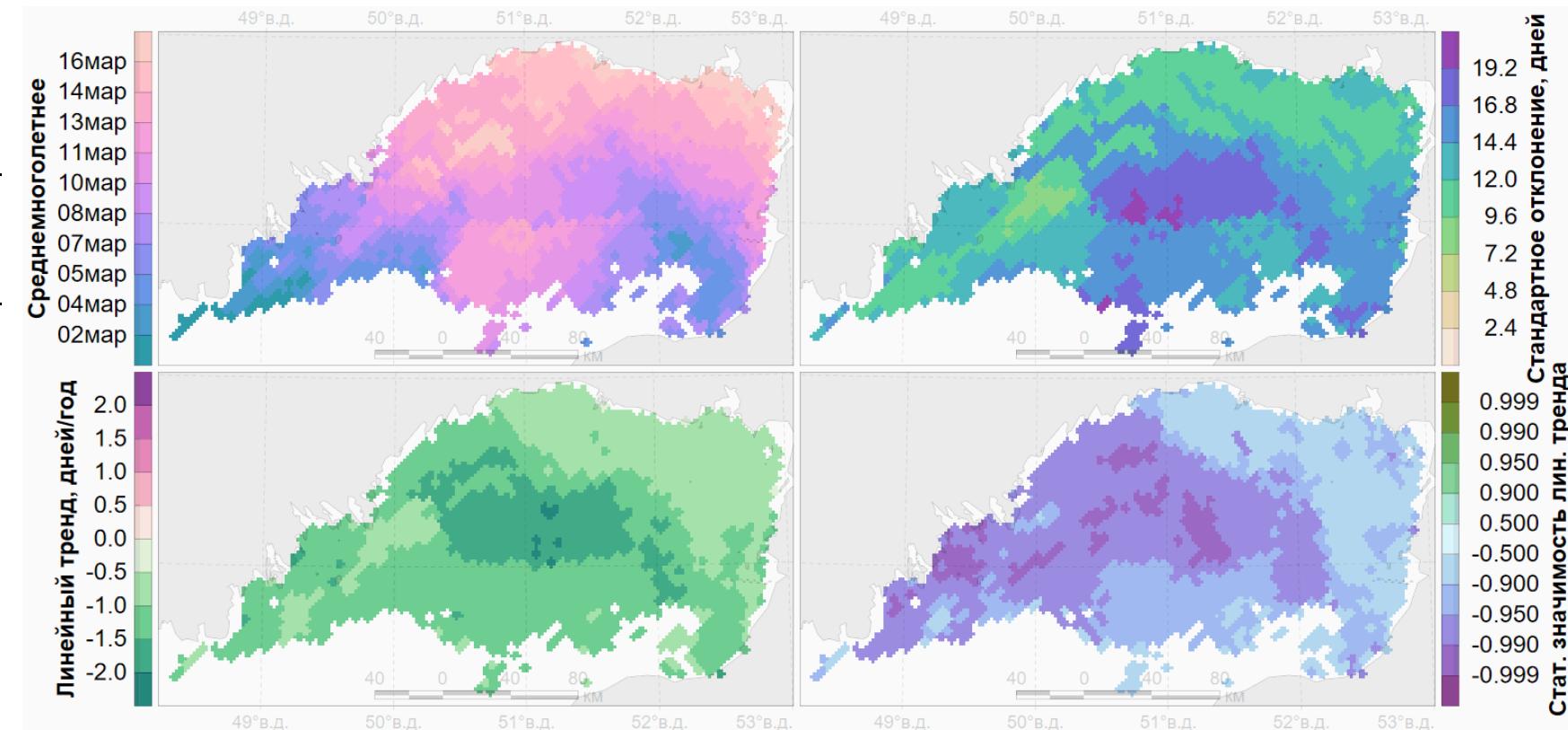
•

Ледовый период

Верификация

Окружающая среда

Заключение



# Введение

## Методы

## Результаты

Появление льда

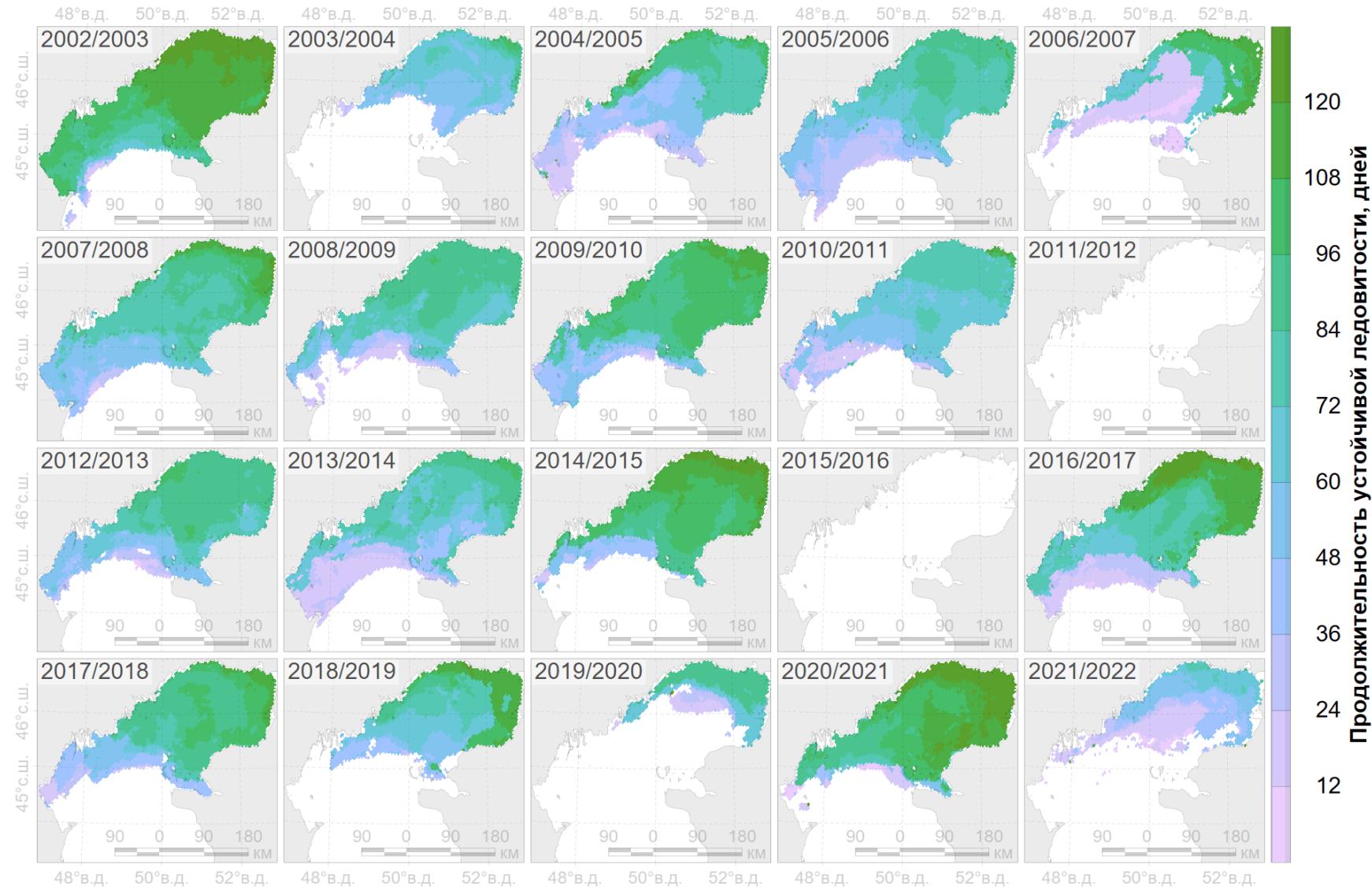
Исчезновение льда

### Ледовый период

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение



По фенокартам появления и исчезновения льда.

# Введение

## Методы

## Результаты

Появление льда

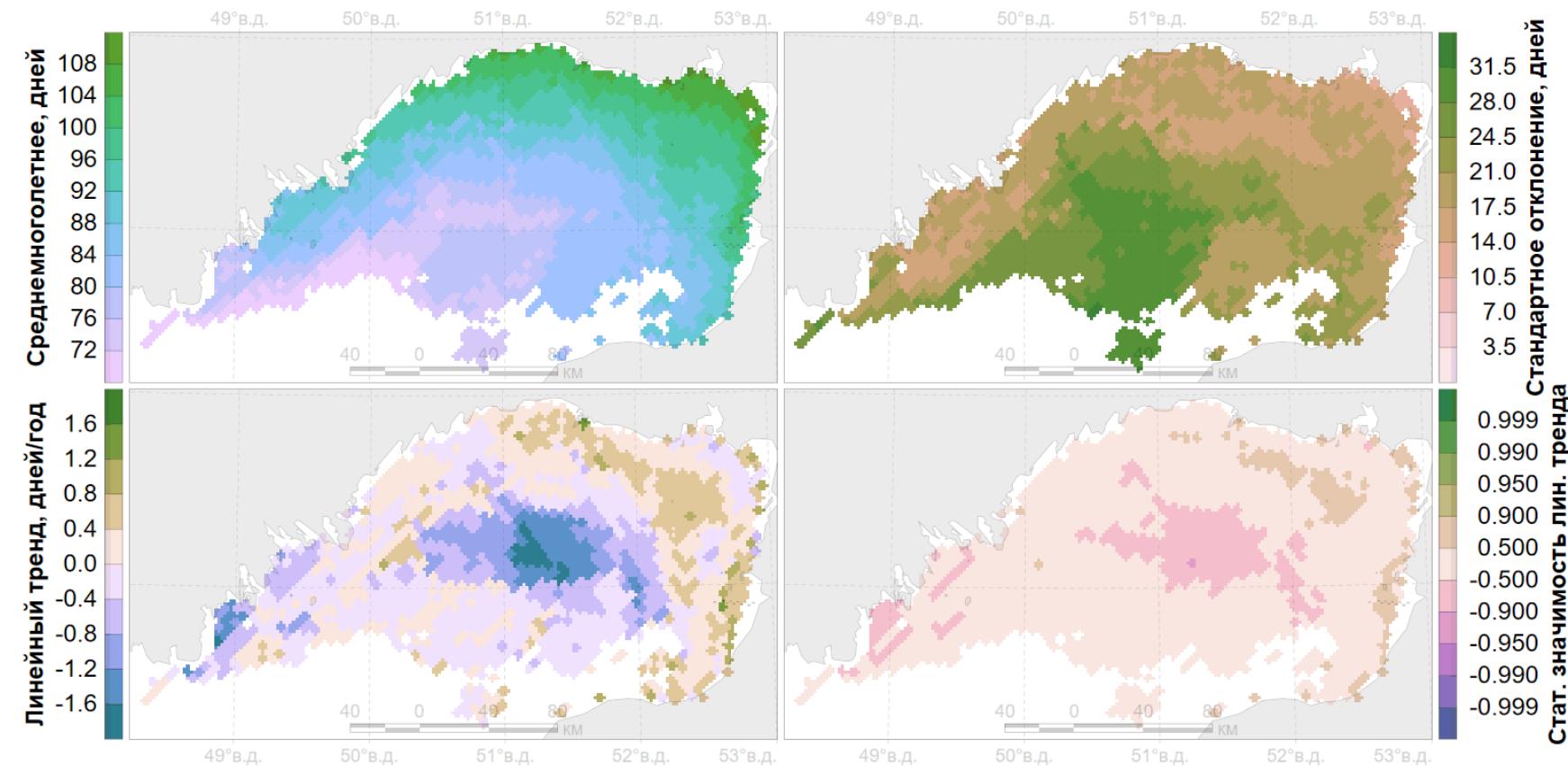
Исчезновение льда

### Ледовый период

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение



Введение

Методы

Результаты

## Верификация

Появление льда

Исчезновение льда

Ледовый период

Площадь льда

Окружающая среда

Заключение

## MERRA2 – реанализ

- Данные ретроспективного анализа поверхностных океанографических данных MERRA-2 (Global Modeling And Assimilation Office, 2015)
  - Пространственное разрешение:  $0.500^\circ \times 0.625^\circ$
  - Временное разрешение: 1 час
  - Временной охват: с 01 января 1980 г. по 02 октября 2024 г.

## VIR (visual, infrared) – оптический и ИК диапазоны

- Данные сплоченности морского льда в ежедневной оценке глобальной температуры поверхности моря на основе спутниковых наблюдений (Lopez, 2019)
  - Пространственное разрешение  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$
  - Временное разрешение: 1 сутки
  - Временной охват: с 1981 по 2022 гг.

## PM (passive microwave) – собственное СВЧ излучение

- это исследование (Du Kimball et al., 2017)
  - Пространственное разрешение 5км × 5км
  - Временное разрешение: 1 сутки
  - Временной охват: 2002-06-06 - 2011-10-03, 2012-07-24 - 2022-12-31



Введение

Методы

Результаты

## Верификация

### Появление льда •

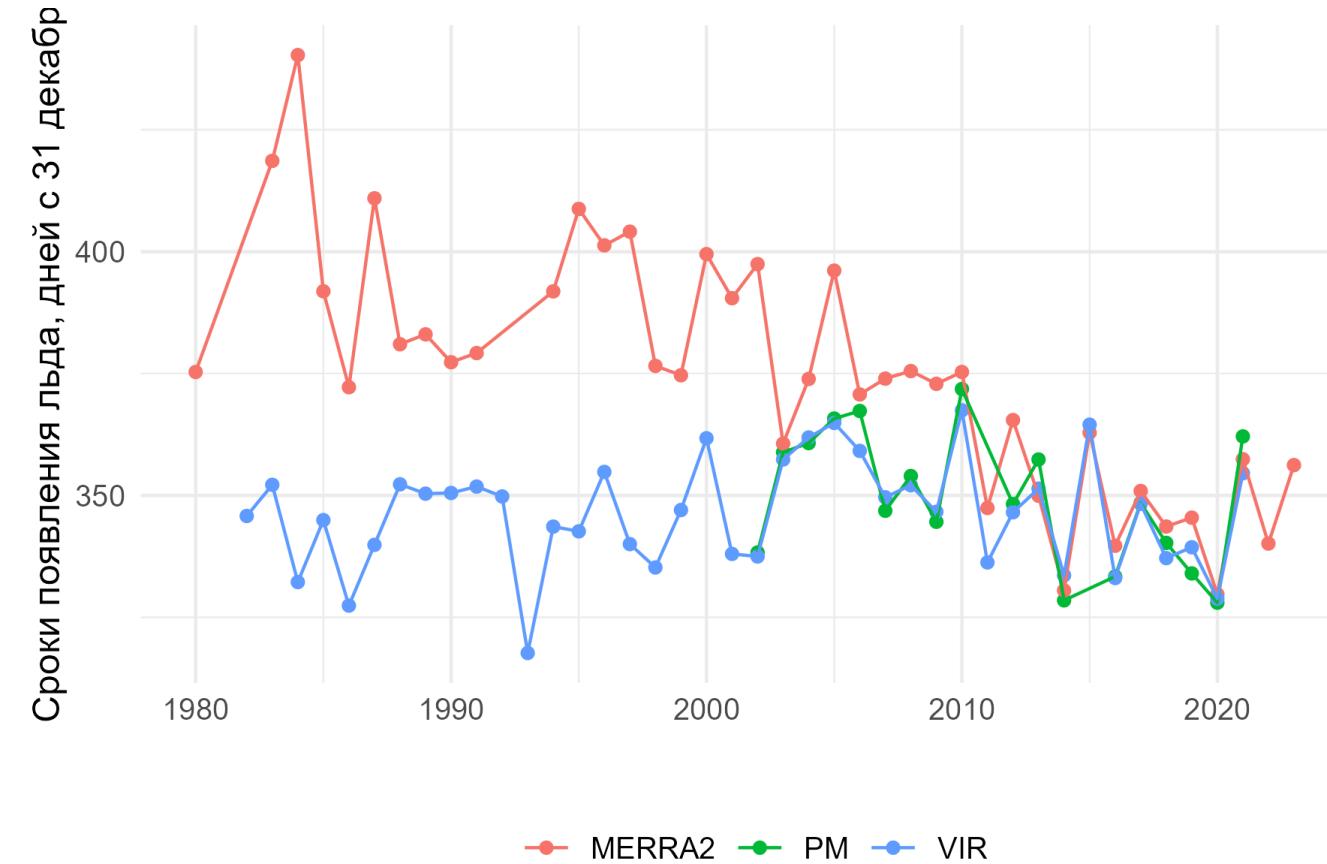
Исчезновение льда

Ледовый период

Площадь льда

Окружающая  
среда

Заключение



data	min	max	avg	slope	obs
PM	23Nov (2020)	07Jan (2010)	15Dec±13.7	-1.0±0.5 (S=0.94)	20 (2002-2021)
MERRA2	25Nov (2020)	01Feb (2002)	28Dec±19.9	-2.5±0.5 (S>0.999)	20 (2002-2021)
VIR	24Nov (2020)	02Jan (2010)	14Dec±11.5	-1.0±0.4 (S=0.97)	20 (2002-2021)
MERRA2	25Nov (2020)	15Mar (1984)	10Jan±24.8	-1.5±0.2 (S>0.999)	44 (1980-2023)
VIR	14Nov (1993)	02Jan (2010)	12Dec±11.2	+0.1±0.2 (S=0.40)	40 (1982-2021)



# Введение

# Методы

# Результаты

# Верификация

## Появление льда •

Исчезновение льда

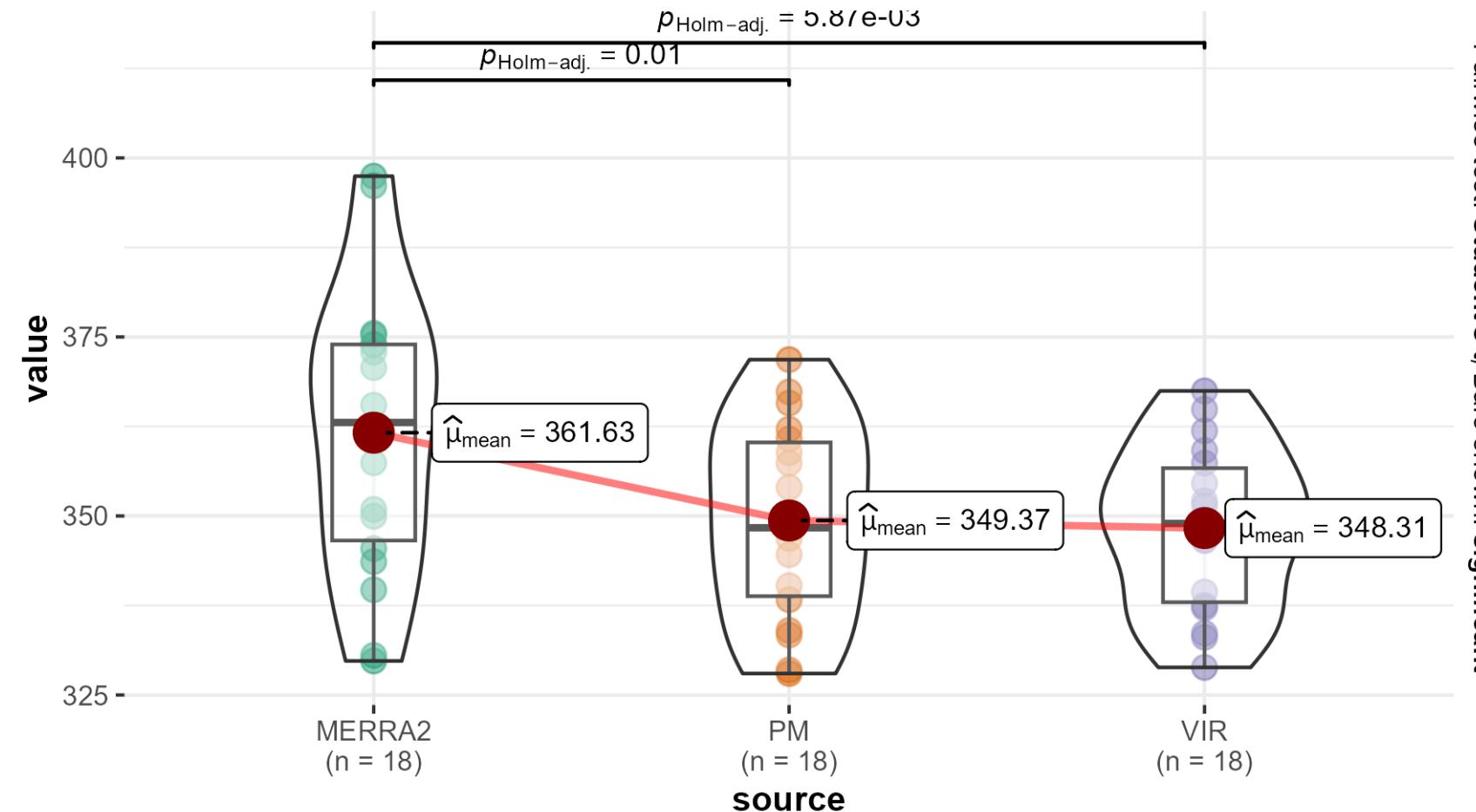
Ледовый период

Площадь льда

Окружающая среда

Заключение

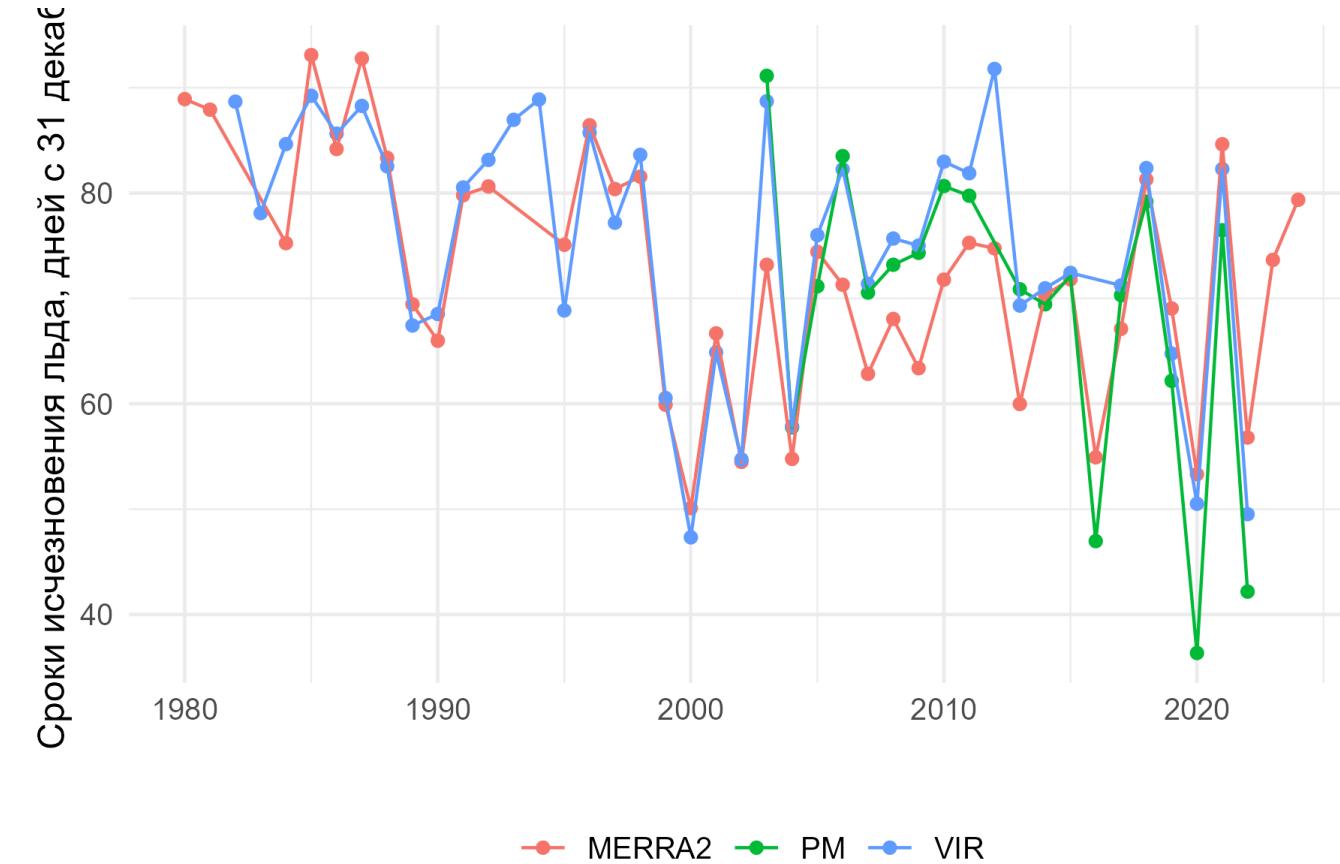
$$F_{\text{Fisher}}(1.08, 18.43) = 11.45, p = 2.71e-03, \widehat{\omega_p^2} = 0.12, \text{CI}_{95\%} [0.00, 1.00], n_{\text{pairs}} = 18$$



$$\log_e(BF_{01}) = -5.09, \widehat{R^2}_{\text{posterior}}^{\text{Bayesian}} = 0.67, \text{CI}_{95\%}^{\text{HDI}} [0.51, 0.77], r_{\text{Cauchy}}^{\text{JZS}} = 0.71$$

$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9691$$





data	min	max	avg	slope	obs
PM	05Feb (2020)	01Apr (2003)	11Mar±13.5	-1.1±0.5 (S=0.97)	20 (2003-2022)
MERRA2	22Feb (2020)	26Mar (2021)	09Mar±8.6	+0.0±0.3 (S=0.10)	20 (2003-2022)
VIR	19Feb (2022)	30Mar (2003)	14Mar±11.1	-0.7±0.4 (S=0.91)	20 (2003-2022)
MERRA2	19Feb (2000)	03Apr (1985)	13Mar±11.3	-0.4±0.1 (S>0.99)	45 (1980-2024)
VIR	16Feb (2000)	01Apr (2012)	16Mar±11.9	-0.4±0.1 (S=0.99)	41 (1982-2022)

# Введение

# Методы

# Результаты

# Верификация

## Появление льда

## Исчезновение льда

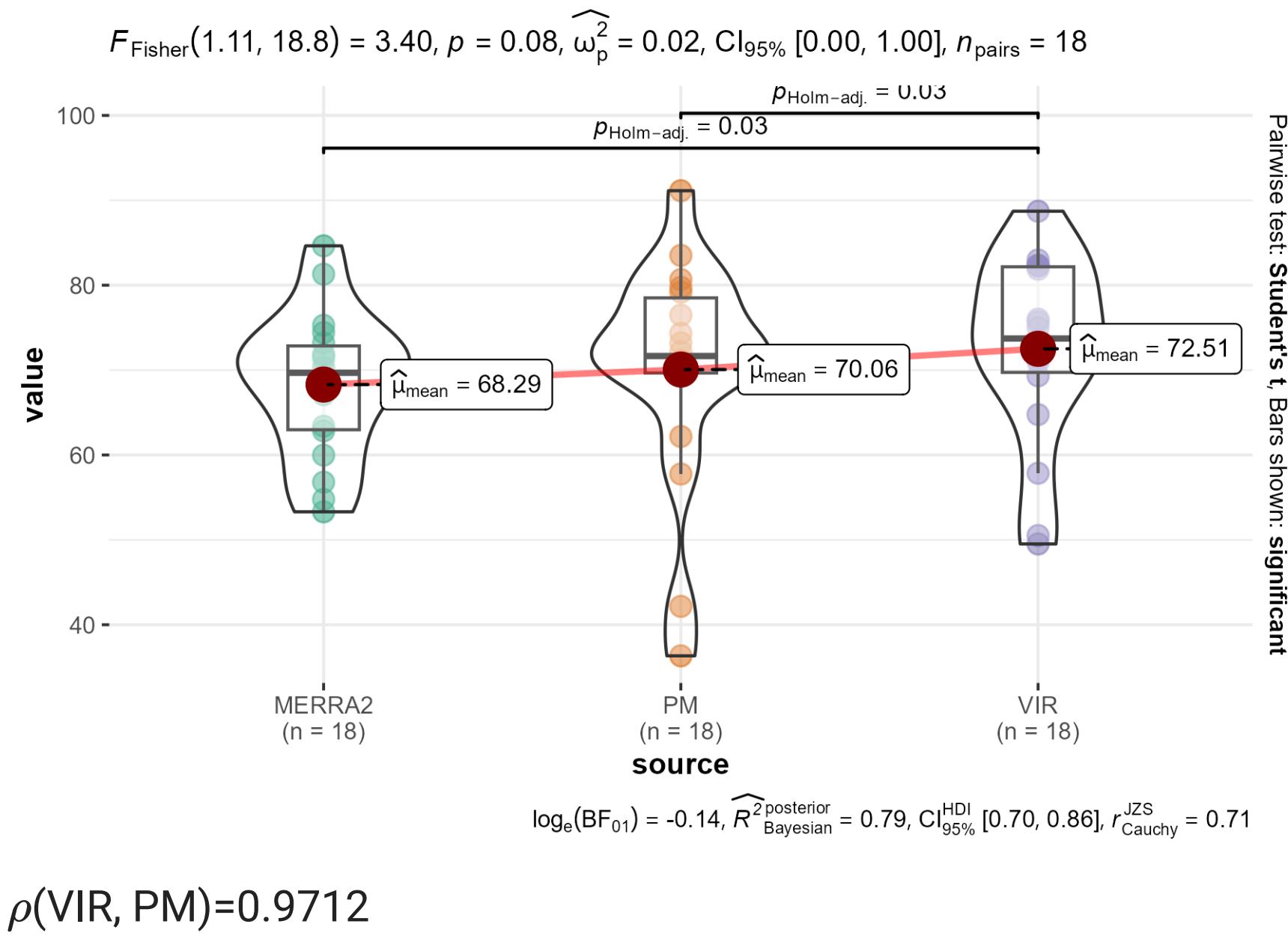
•

## Ледовый период

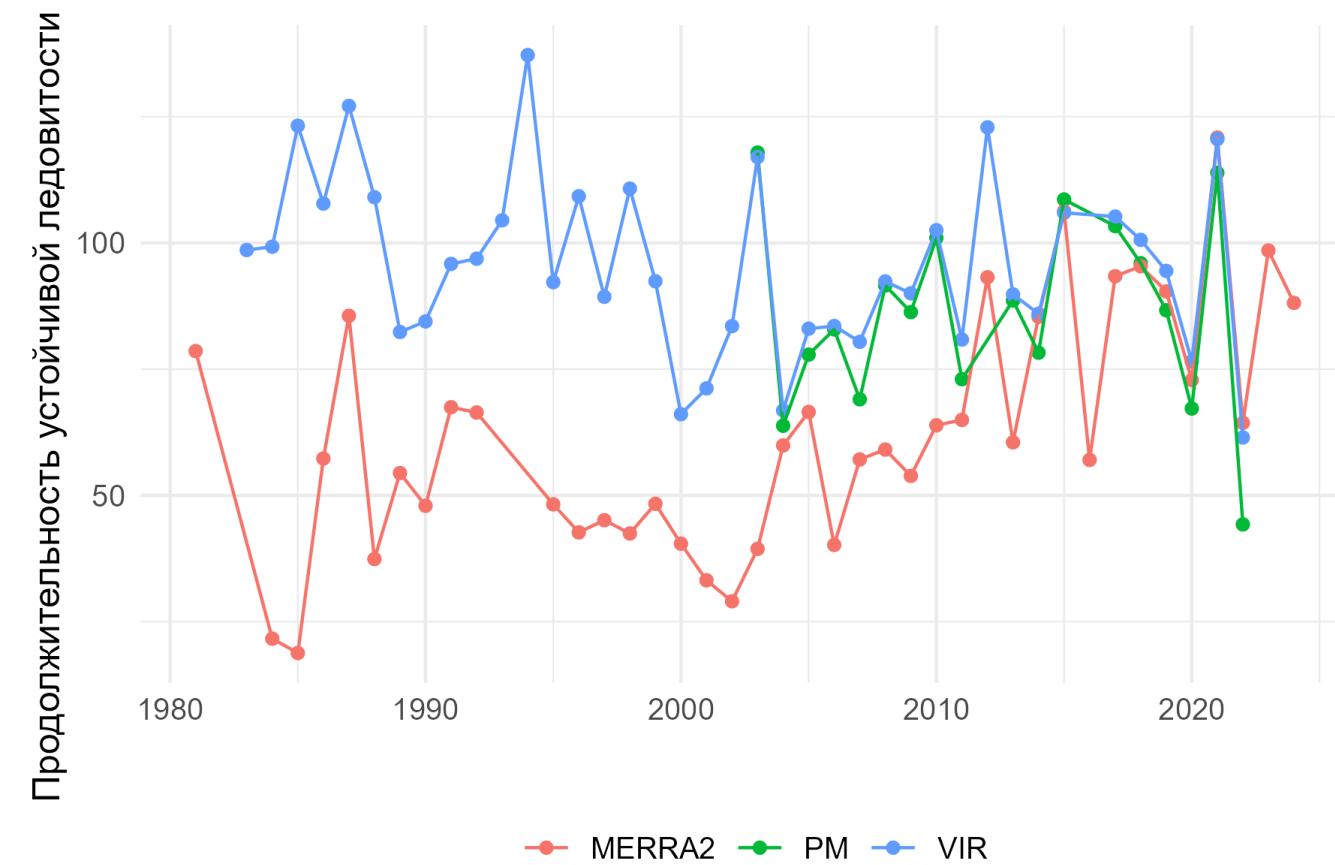
## Площадь льда

## Окружающая среда

## Заключение



Введение  
Методы  
Результаты  
**Верификация**  
Появление льда  
Исчезновение льда  
**Ледовый период •**  
Площадь льда  
Окружающая среда  
Заключение



data	min	max	avg	slope	obs
PM	44 (2022)	118 (2003)	86±19	-0.2±0.8 (S=0.16)	20 (2003-2022)
MERRA2	39 (2003)	121 (2021)	72±22	+2.6±0.6 (S>0.999)	20 (2003-2022)
VIR	61 (2022)	121 (2021)	91±16	+0.2±0.6 (S=0.26)	20 (2003-2022)
MERRA2	19 (1985)	121 (2021)	62±24	+1.1±0.2 (S>0.999)	44 (1981-2024)
VIR	61 (2022)	137 (1994)	96±18	-0.4±0.2 (S=0.89)	40 (1983-2022)



# Введение

# Методы

# Результаты

# Верификация

## Появление льда

## Исчезновение льда

## Ледовый период

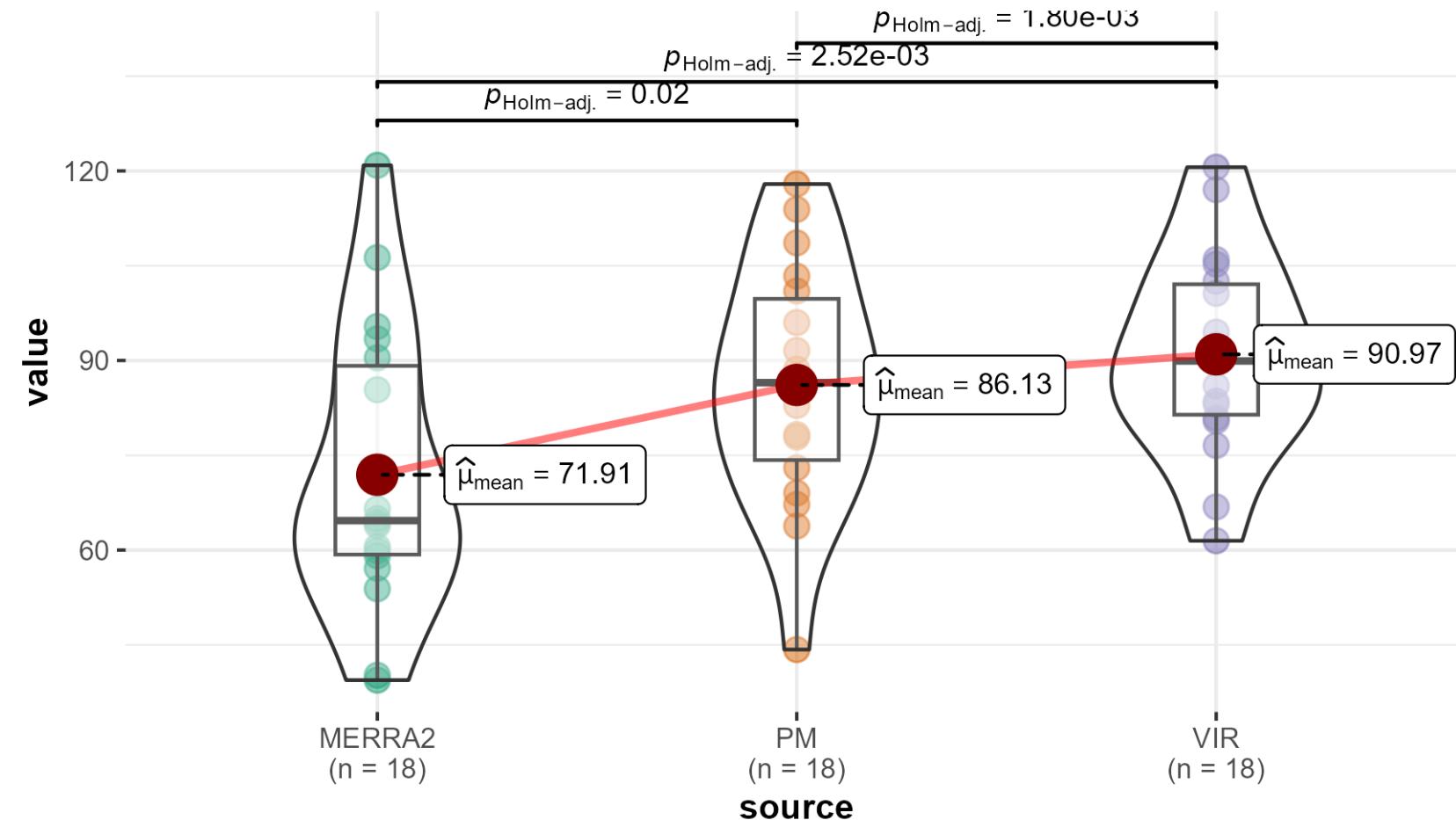
## Площадь льда

## Окружающая среда

## Заключение

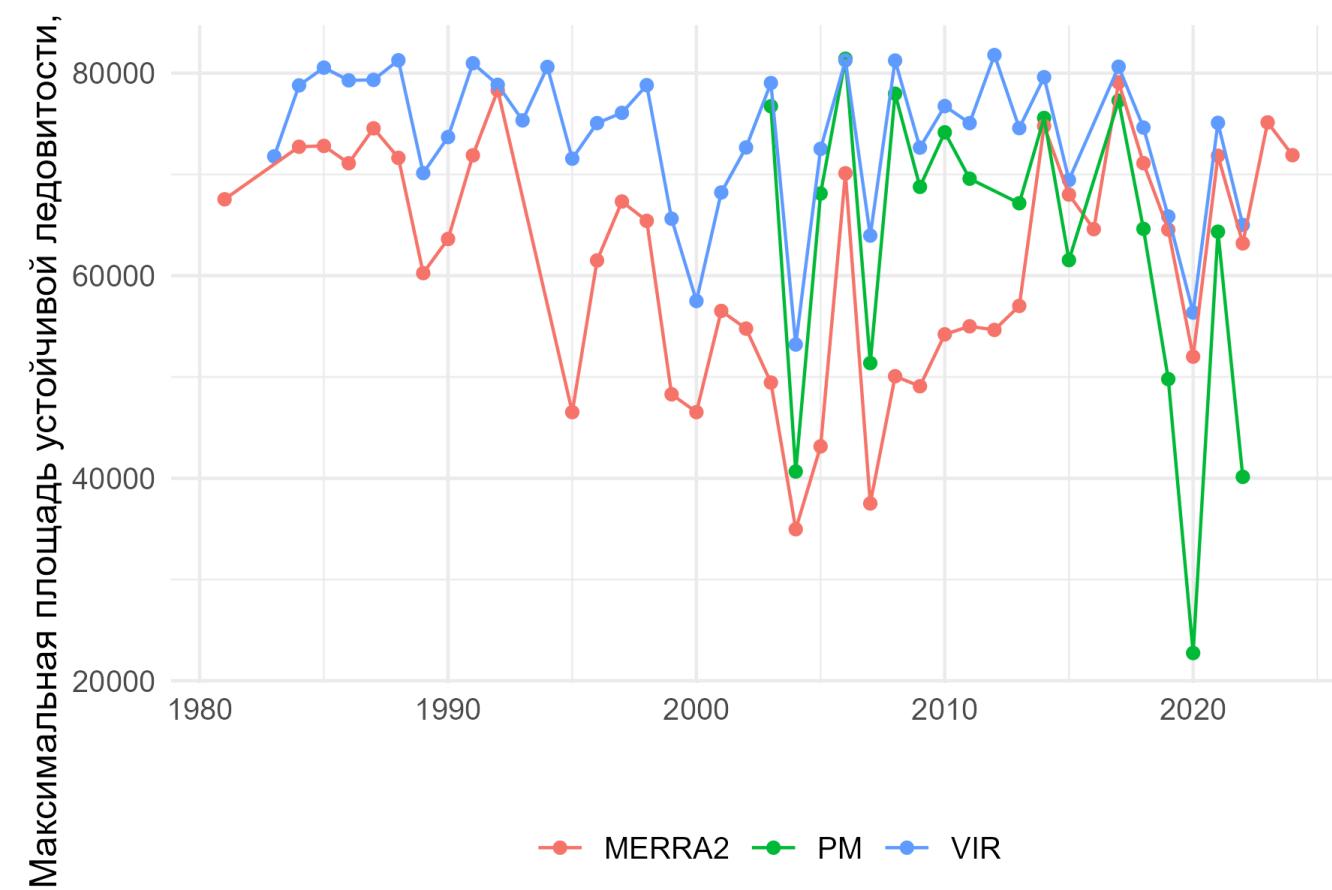


$$F_{\text{Fisher}}(1.05, 17.78) = 10.29, p = 4.53e-03, \widehat{\omega_p^2} = 0.14, \text{CI}_{95\%} [0.00, 1.00], n_{\text{pairs}} = 18$$



$$\log_e(BF_{01}) = -4.57, \widehat{R^2}_{\text{posterior}}^{\text{Bayesian}} = 0.58, \text{CI}_{95\%}^{\text{HDI}} [0.40, 0.72], r_{\text{Cauchy}}^{\text{JZS}} = 0.71$$

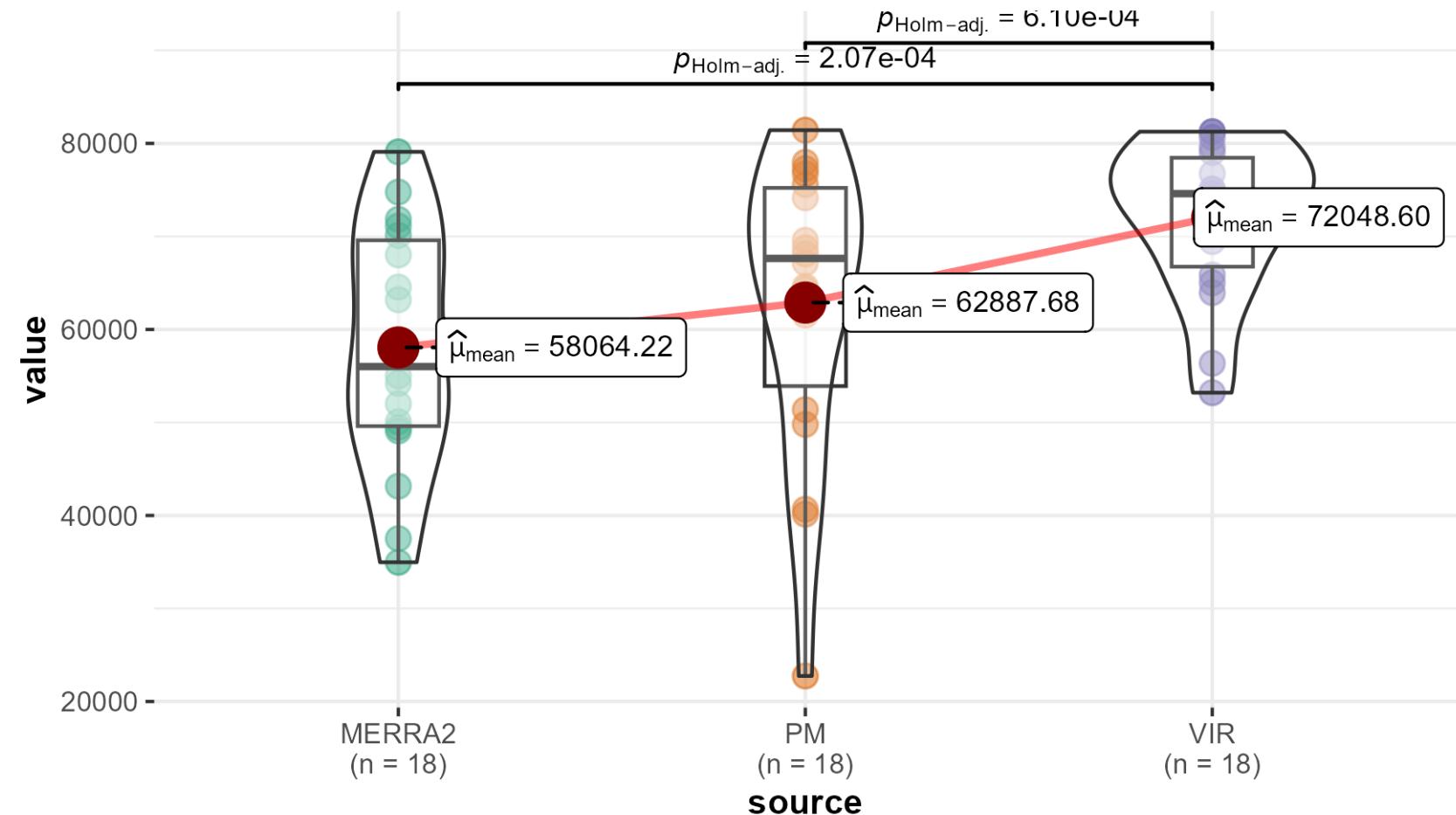
$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9776$$



data	min	max	avg	slope	obs
PM	23 (2020)	81 (2006)	63±16	-1.0±0.6 (S=0.90)	20 (2003-2022)
MERRA2	35 (2004)	79 (2017)	58±13	+1.4±0.4 (S>0.99)	20 (2003-2022)
VIR	53 (2004)	81 (2006)	72±8	-0.2±0.3 (S=0.43)	20 (2003-2022)
MERRA2	35 (2004)	79 (2017)	62±12	-0.1±0.2 (S=0.37)	44 (1981-2024)
VIR	53 (2004)	82 (2012)	74±7	-0.2±0.1 (S=0.92)	40 (1983-2022)

Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Появление льда  
Исчезновение льда  
Ледовый период  
**Площадь льда**  
Окружающая среда  
Заключение

$$F_{\text{Fisher}}(1.23, 20.97) = 11.05, p = 1.98e-03, \widehat{\omega_p^2} = 0.16, \text{CI}_{95\%} [0.00, 1.00], n_{\text{pairs}} = 18$$



$$\log_e(BF_{01}) = -5.06, \widehat{R^2}_{\text{posterior}}^{\text{Bayesian}} = 0.57, \text{CI}_{95\%}^{\text{HDI}} [0.38, 0.70], r_{\text{Cauchy}}^{\text{JZS}} = 0.71$$

$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9415$$

Введение

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Температура  
воздуха

Заключение

## ФАКТОРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### Параметры

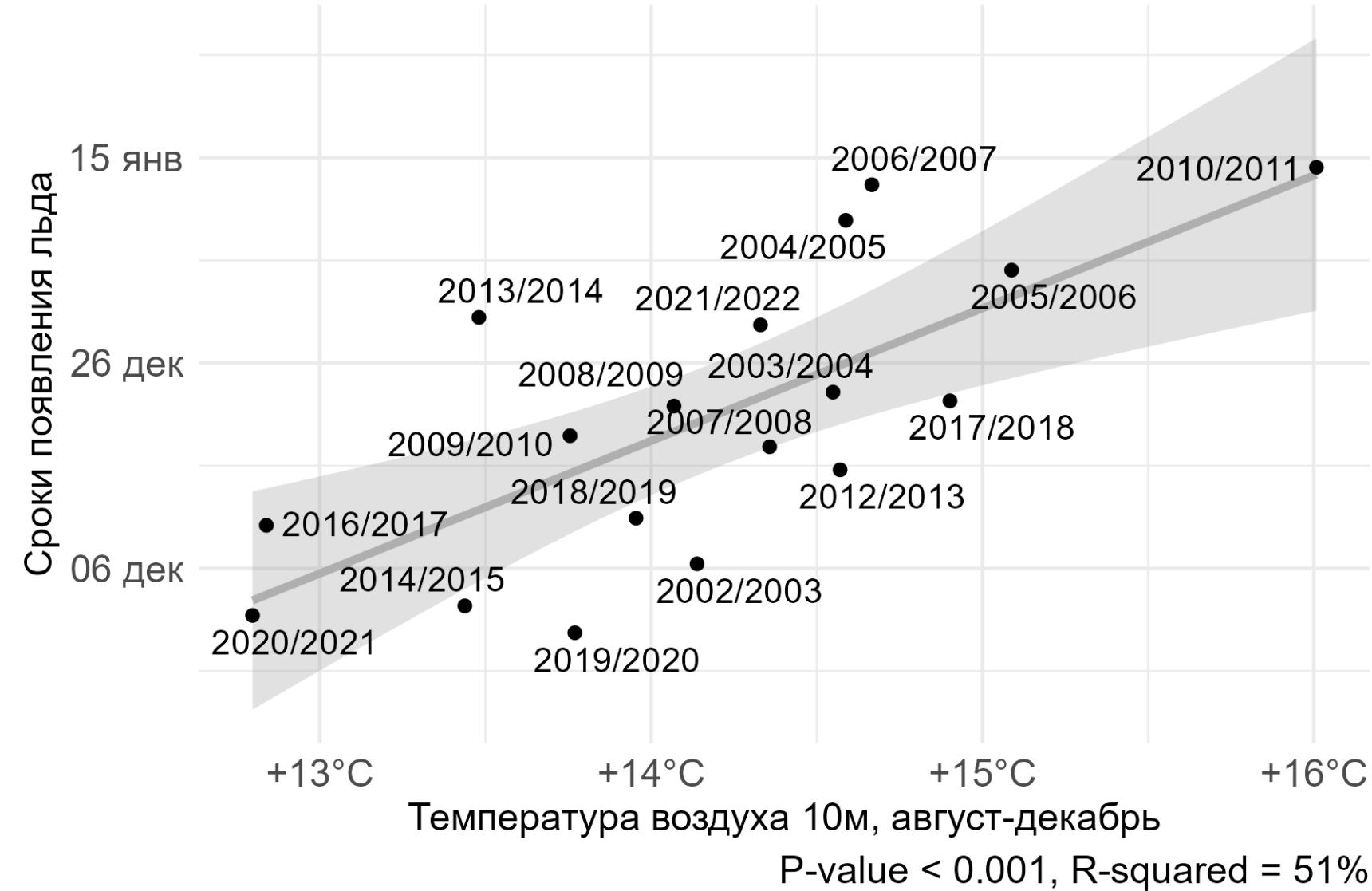
- Пространственные данные
  - Температура воздуха (Global Modeling And Assimilation Office, 2015)
  - Скорость меридианного и зонального ветра (Global Modeling And Assimilation Office, 2015)
  - Температура воды (Lopez, 2019)
- Точечные данные:
  - Уровень моря (Copernicus Climate Change Service, 2020)

### Методы

- Регрессионный анализ сводных характеристик
- Корреляционный анализ региональных связей



- Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая среда  
Температура воздуха
- 
- Появление льда •
- 
- Исчезновение льда  
Ледовый период  
Площадь льда
- 
- Заключение



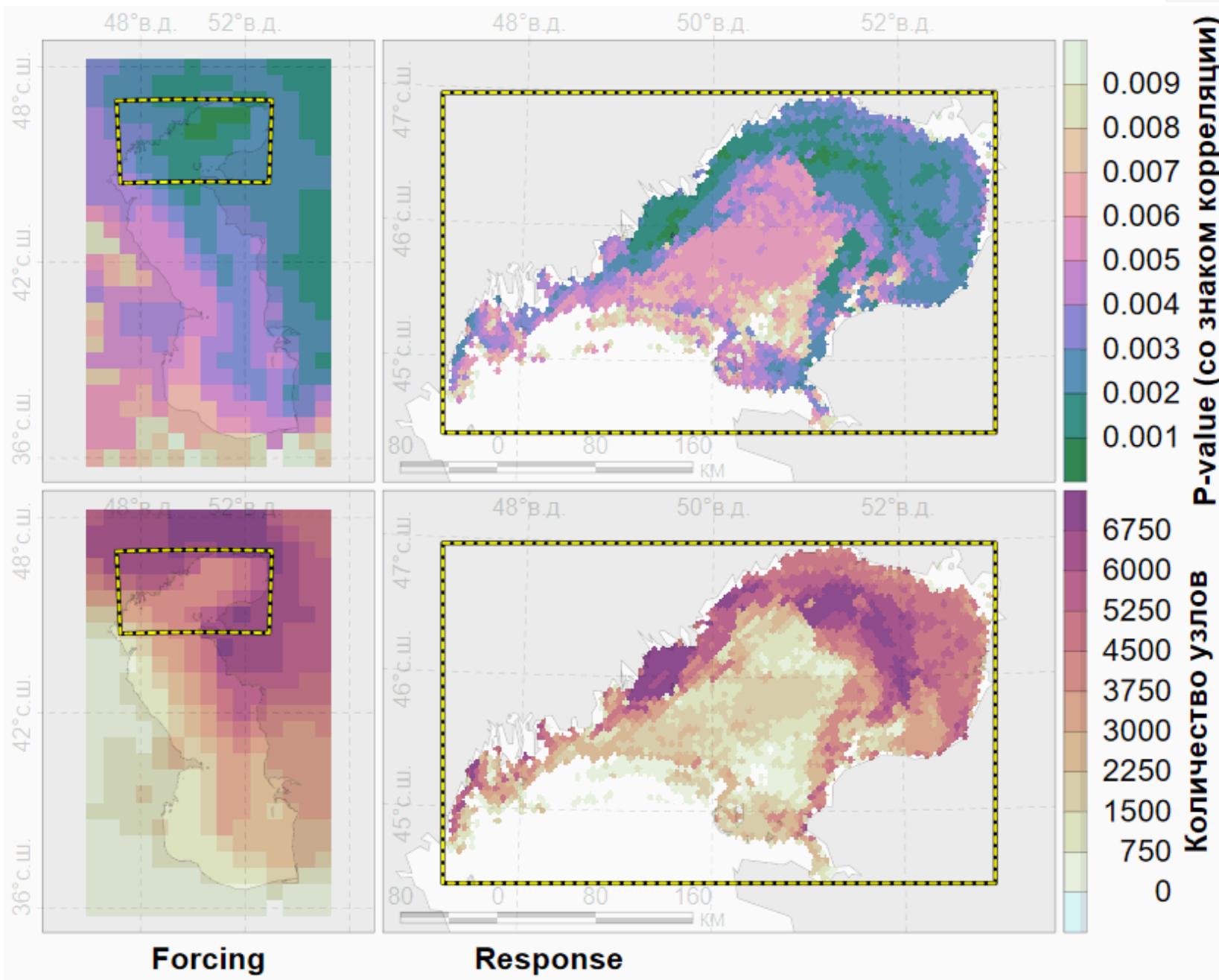
Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая  
среда  
Температура  
воздуха

---

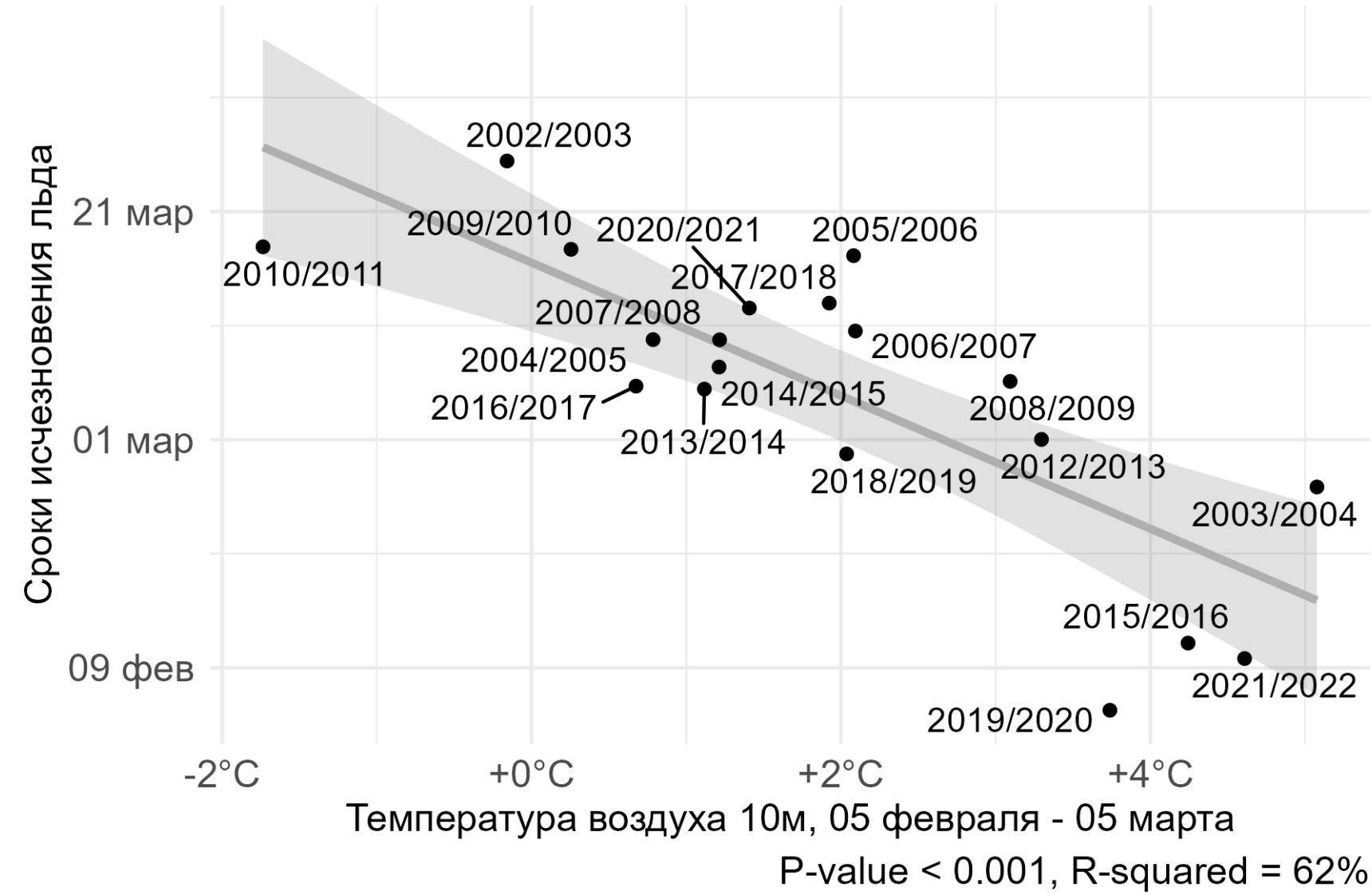
Появление льда •  
Исчезновение льда  
Ледовый период  
Площадь льда

---

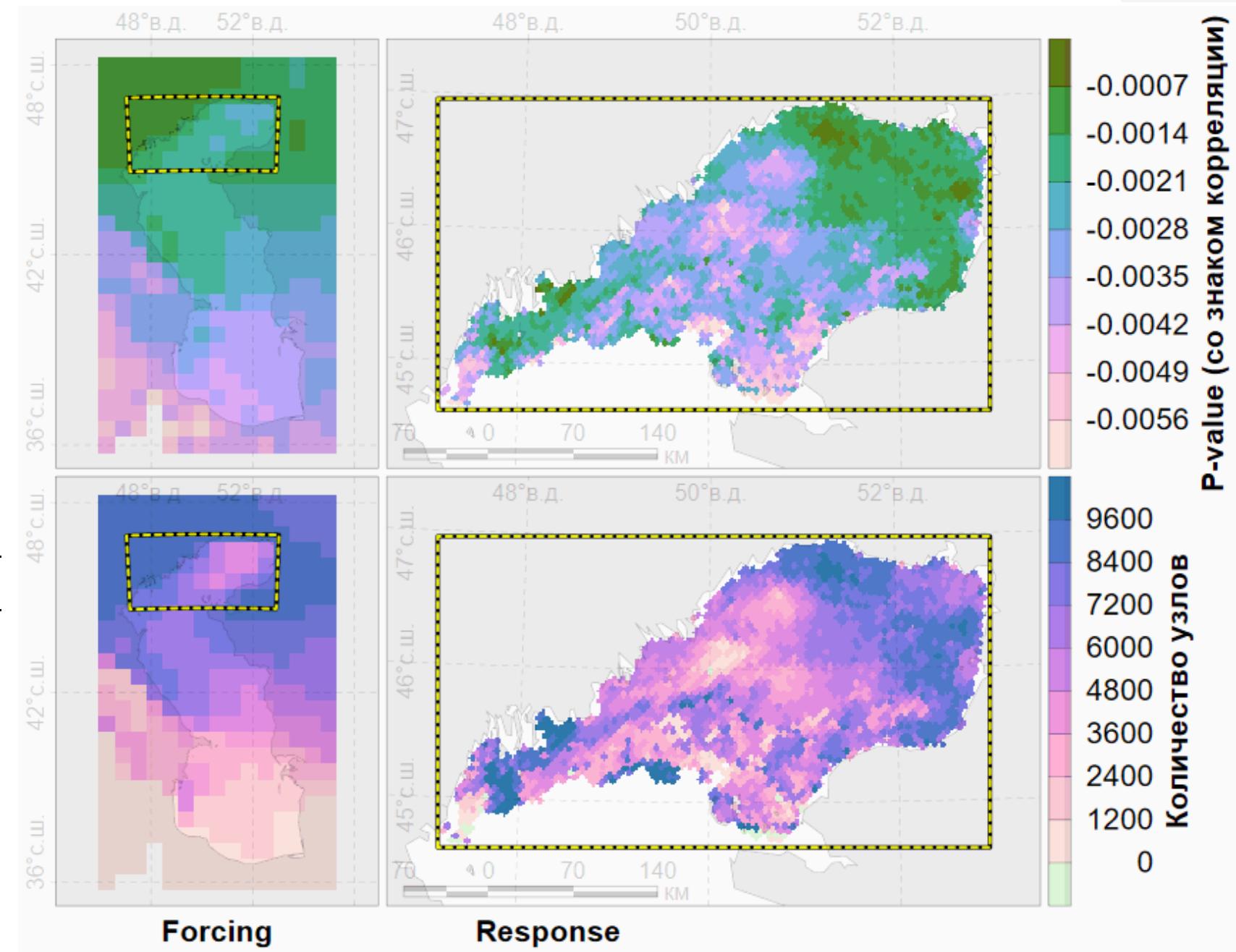
Заключение



- Введение
- Методы
- Результаты
- Верификация
- Окружающая среда
- Температура воздуха
- Появление льда
- Исчезновение льда**
- Ледовый период
- Площадь льда
- Заключение



Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая среда  
Температура воздуха  
Появление льда  
**Исчезновение льда**  
Ледовый период  
Площадь льда  
Заключение

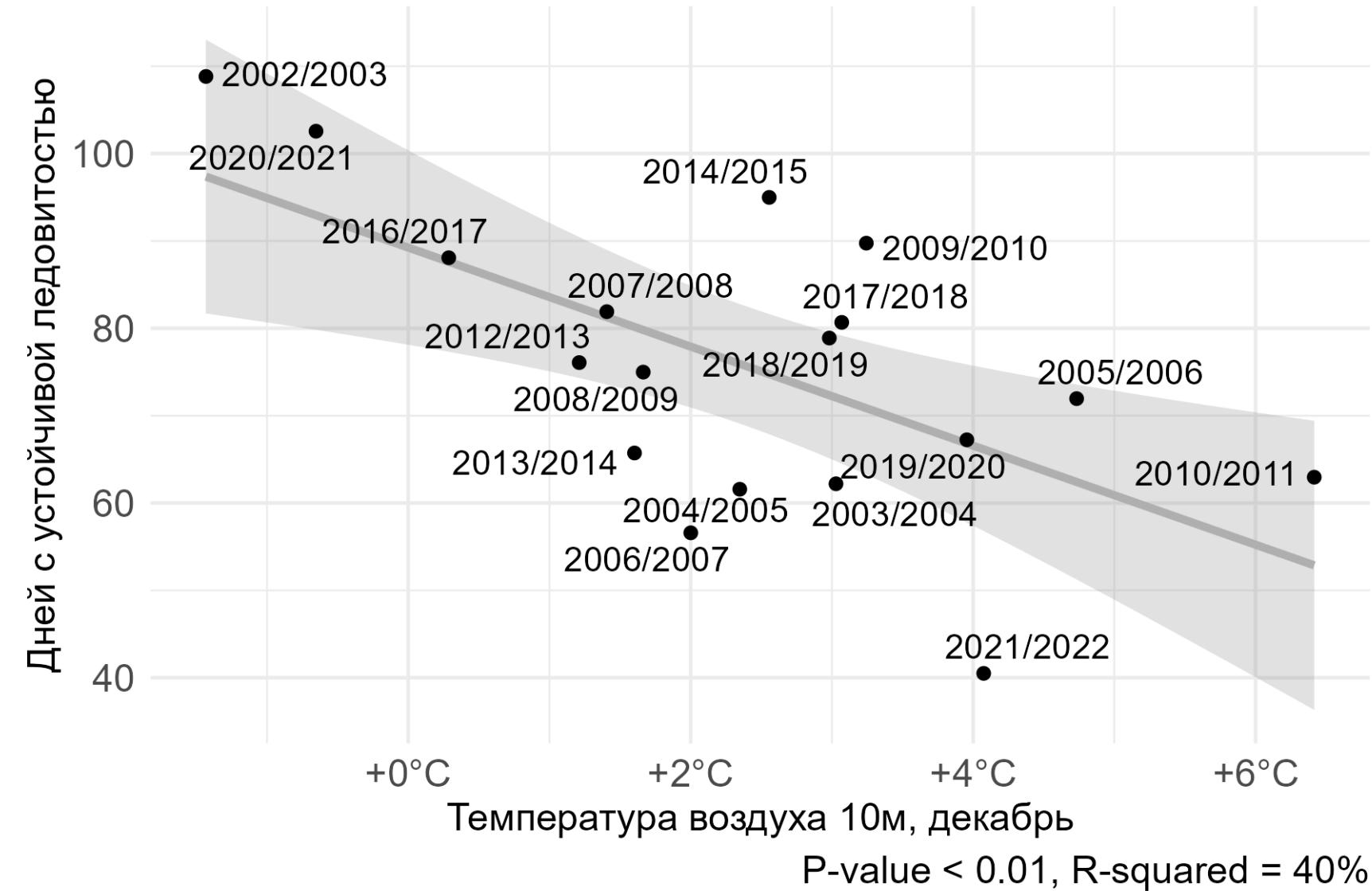


Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая среда  
Температура воздуха  
Появление льда  
Исчезновение льда

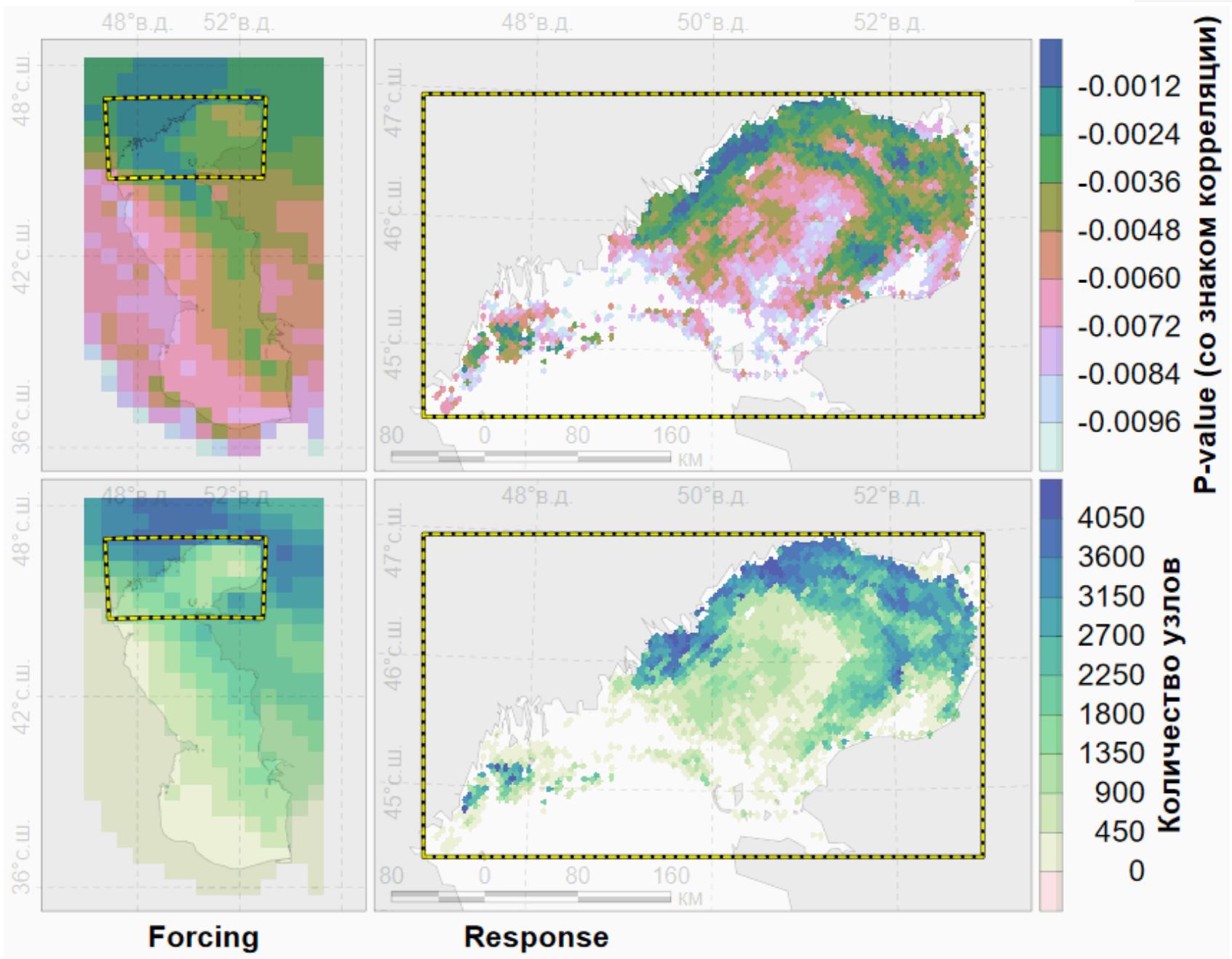
---

Ледовый период •  
Площадь льда

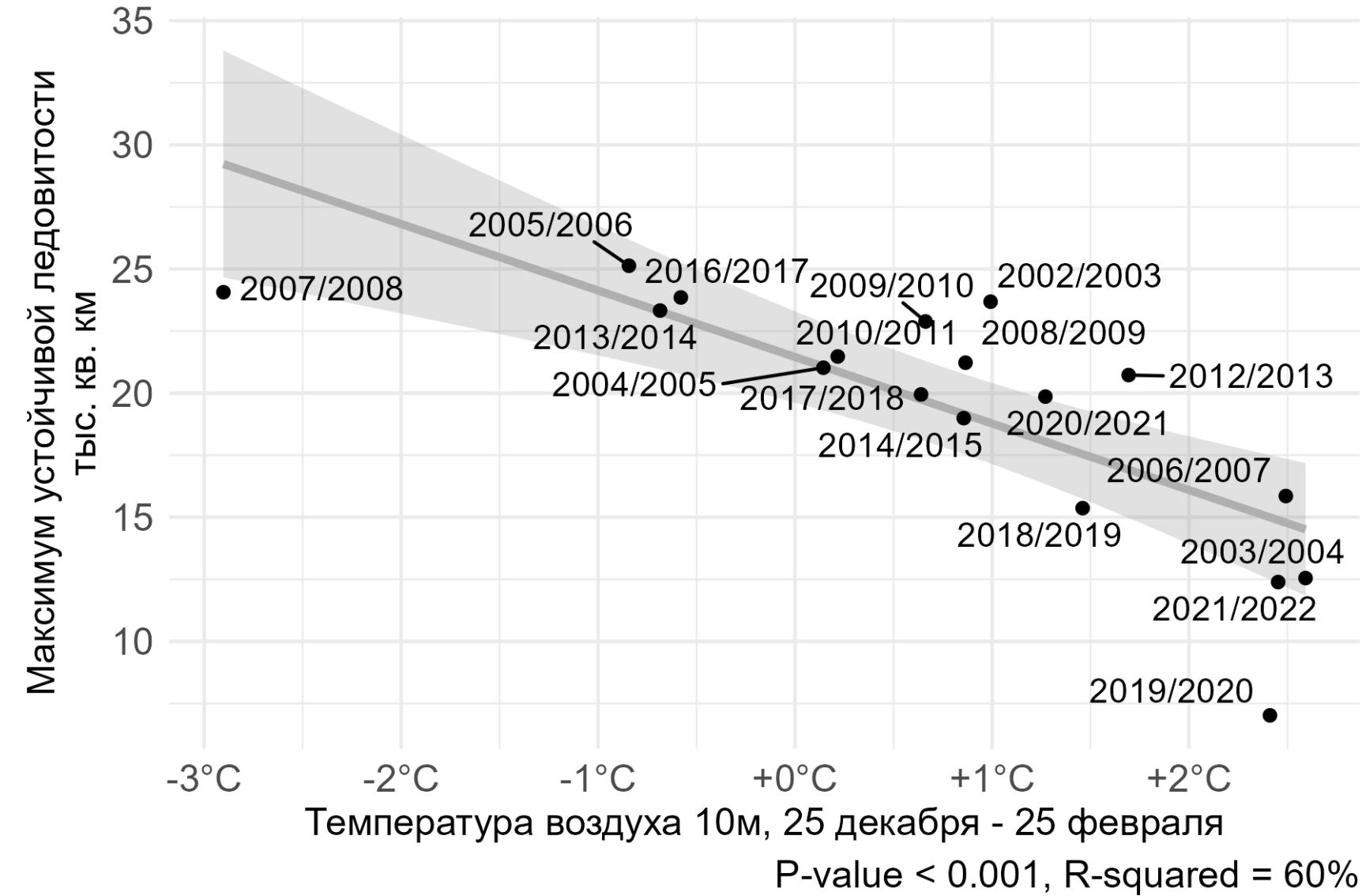
Заключение



Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая среда  
Температура воздуха  
Появление льда  
Исчезновение льда  
**Ледовый период** •  
Площадь льда  
Заключение



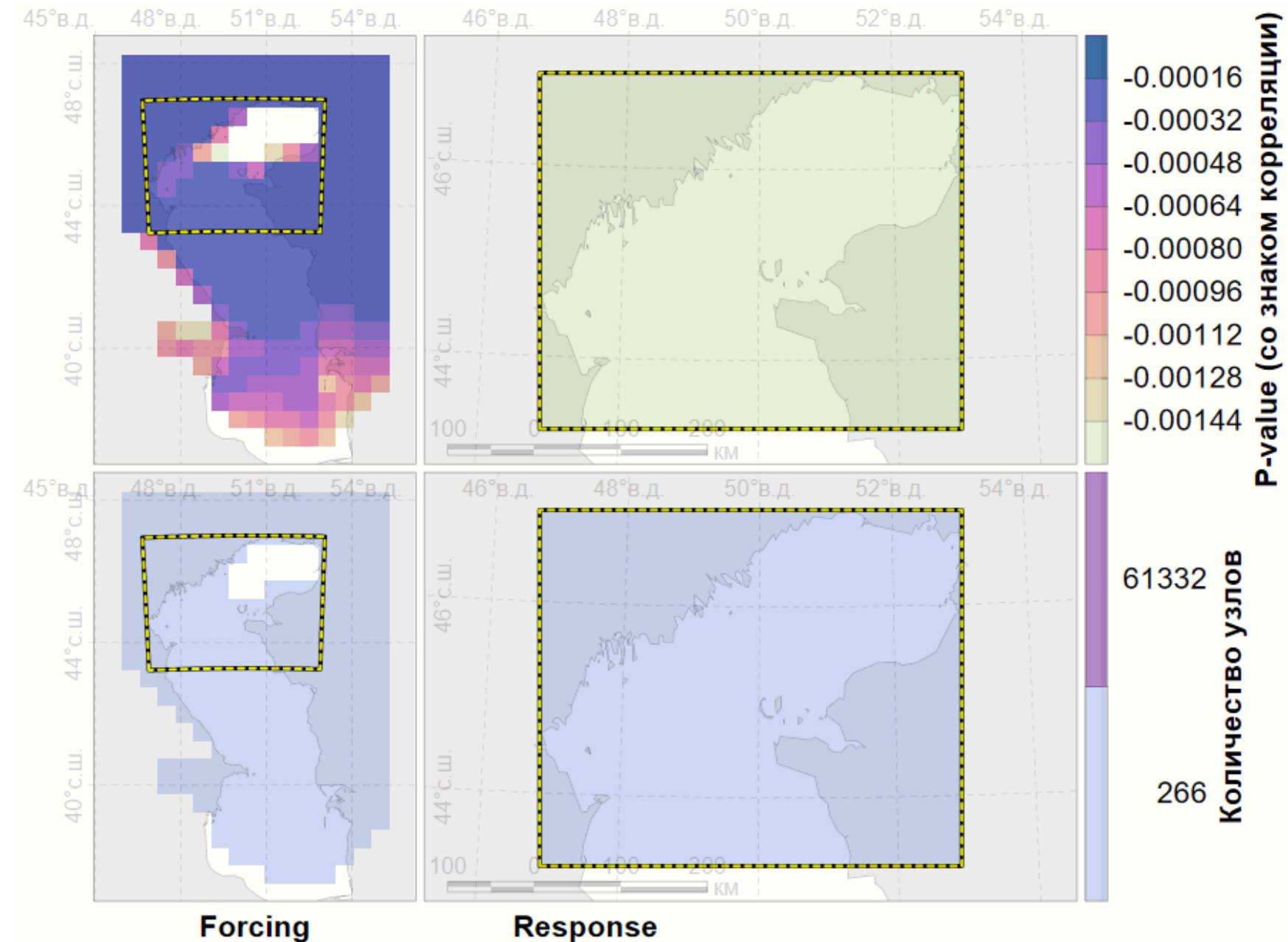
Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая среда  
Температура воздуха  
Появление льда  
Исчезновение льда  
Ледовый период  
**Площадь льда ••**  
Заключение



Введение  
Методы  
Результаты  
Верификация  
Окружающая  
среда  
Температура  
воздуха  
Появление льда  
Исчезновение льда  
Ледовый период  
**Площадь льда**  
Заключение



Н. Платонов  
Ледовая фенология



Введение

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

## Заключение

- Ежесуточные данные по ледовому покрытию Каспийского моря за последние две декады либо имеют очень низкое пространственное разрешение, либо не доступны в режиме реального времени.
- Ледовые фенокарты на основе оценок ледового покрова со спутниковых измерениях пассивного микроволнового зондирования в сравнении с видимым и инфракрасным спектром обеспечивают близкие результаты, что может использоваться в ассимиляции продуктов.
- Сроки ледообразования и ледотаяния, продолжительность ледового покрова и площадь максимального распространения льдов имеют высокую вариабельность. Статистически значимая тенденция отмечается в уменьшении площади льдов и в более раннем ледотаянии.
- Тепловой режим в предшествующий осенний период влияет на смещение сроков ледообразования, тогда как сроки ледотаяния больше зависят от текущих условий прогрева воздуха.



Введение

Методы

Результаты

Верификация

Окружающая  
среда

Заключение

# Спасибо за внимание

## Благодарности

- Соавторам
- Организаторам
- Участникам
- Солнечному  
Дагестану

## О докладчике

Платонов Никита Геннадьевич

с.н.с. ИПЭЭ РАН, к.т.н.

Кабинет методов ДЗЗ и тематического  
декодирования в экологии

Программа изучения белого медведя в  
российской Арктике

Постоянно действующая экспедиция  
РАН

 [platonov@sevin.ru](mailto:platonov@sevin.ru)

 [@NikitaPlatonov](https://twitter.com/NikitaPlatonov)



Copernicus Climate Change Service (2020). *Lake water levels from 1992 to present derived from satellite observations*. DOI: 10.24381/CDS.5714C668.

Du, J., J. Kimball, and C. Duguay (2017). *Daily Lake Ice Phenology Time Series Derived from AMSR-E and AMSR2*. Version 1. DOI: 10.5067/HT4NQ07ZJF7M. (Visited on Jan. 27, 2024).

Global Modeling And Assimilation Office (2015). *MERRA-2 tavg1\_2d\_ocn\_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Ocean Surface Diagnostics V5.12.4*. Maintained by Steven Pawson. Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/Y67YQ1L3ZZ4R. (Visited on Oct. 23, 2024).

Lopez, A. (2019). *Sea surface temperature daily data from 1981 to present derived from satellite observations*. DOI: 10.24381/CDS.CF608234. (Visited on Oct. 24, 2024).

Turner, T. and P. Wollan (1997). "Locating a maximum using isotonic regression". In: *Computational Statistics & Data Analysis* 25.3, pp. 305-320. DOI: 10.1016/s0167-9473(97)00009-1.

Рожнов, В., Н. Платонов, С. Найденко, И. Мордвинцев, and Е. Иванов (2017). "Перемещение самки белого медведя в Карском море в период летнего таяния льда". In: *Доклады Академии наук*, pp. 359-363. DOI: 10.7868/S0869565217030276.

1. В данной работе – не кригинг