

ЛЕДОВАЯ ФЕНОЛОГИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Платонов Н. Г., ИПЭЭ РАН, г. Москва

Соловьёва М. А., ИПЭЭ РАН, г. Москва

Рожнов В. В., ИПЭЭ РАН, г. Москва

Международная научная конференция
«Каспийский тюлень: индикатор состояния каспийской экосистемы»
Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, г. Махачкала
12-14 ноября 2024 г.

Аннотация

Каспийский тюлень — пагофильный вид ластоногих, использующий морской лёд, прежде всего, для размножения, включая спаривание и лактацию, а также для отдыха в зимний период. Продолжительность ледового сезона, особенно с момента появления детенышей, определяет выживаемость бельков. Поэтому оценки сроков появления и исчезновения льда на различных участках акватории Каспийского моря дополняют набор параметров, используемых для оценки благополучия популяции каспийского тюленя, а применение многолетних рядов данных позволяет осуществлять мониторинг ледовых местообитаний.

В связи с этим в данной работе рассмотрена возможность применения набора данных по ледовой фенологии озёр северного полушария “Daily Lake Ice Phenology Time Series Derived from AMSR-E and AMSR2” Национального центра данных по льду и снегу (США) для построения многолетних карт сроков появления и исчезновения льда Каспийского моря за период с 2002 по 2022 гг. Для оценки сроков ледовой фенологии применена унимодальная изотоническая регрессия временных рядов сплоченности морского льда, выделенной из ледовых категорий, с предварительной пространственно-временной аппроксимацией пропусков исходных данных. Для верификации использовались фенокарты, построенные тем же методом, по данным ретроспективного анализа поверхностных океанографических данных MERRA-2 и по данным сплоченности морского льда в ежедневной оценке глобальной температуры поверхности моря на основе спутниковых наблюдений.

Ежегодно, в среднем, 63 тыс. км² (стандартное отклонение 16 тыс. км²) Каспийского моря покрывается льдом не менее чем на 6 дней. Больше всего такого льда было зимой 2005/2006 гг., 81 тыс. км², а меньше всего – зимой 2019/2020 гг., 23 тыс. км². Тенденция изменения этой площади составляет -1.0 ± 0.6 тыс. км² год-1 с умеренной статистической значимостью 90%. За период наблюдений с зимы 2002/2003 по зиму 2021/2022 гг. площадь замерзающей акватории Каспия сократилась на 27% с 73 до 53 тыс. км². Возможная недооценка этого параметра связана с пропуском в исходных данных.

Ледообразование на обычно замерзающей (не менее 9 раз за 10 лет) акватории Каспия происходит, в среднем, 15 декабря (стандартное отклонение 14 дней). Экстремальные значения наблюдались для зим 2020/2021 гг., 23 ноября, и 2010/2011 гг., 07 января. За многолетний период наблюдений отмечается всё более раннее появление льда (-1.0 ± 0.5 дней год-1, S=94%), с 25 декабря зимой 2002/2003 гг. до 06 декабря зимой 2021/2022 гг.

В среднем, обычно замерзающая акватория Каспийского моря освобождается от льда 11 марта (стандартное отклонение 14 дней). Наиболее раннее ледотаяние наблюдалось зимой 2019/2020 г., 05 февраля, а наиболее позднее – зимой 2002/2003 г., 01 апреля. За сезоны с 2002/2003 по 2021/2022 гг. отмечается статистически значимая (S=97%) линейная тенденция более раннего исчезновения льда со скоростью 1.1 ± 0.5 дней год-1, с 21 марта в начале исследуемого периода до 28 февраля в конце.

Продолжительность ледового сезона обычно замерзающей акватории Каспийского моря составляет, в среднем, 86 дней (стандартное отклонение 19 дней). По покрытию льдом наиболее долгой была зима 2002/2003 гг., 118 дней, а наиболее короткой – зима 2021/2022 гг., 44 дня. Линейная тенденция изменения длительности ледового периода не обнаруживается (-0.2 ± 0.8 дней год-1, S=16%).

Ледообразование в северном Каспии задерживается при повышении осенних температур воздуха над Прикаспийской низменностью в начале зимы. Раннее таяние каспийского льда связано с более высокой температурой воздуха преимущественно над средним Каспием. Льда в Каспийском море, как правило, образуется больше, если над западным Каспием и прилегающей территорией в декабре-январе воздух более холодный.

Введение	2
Ледовый покров	2
Ледовые фенокарты	2
Характеристики	2
Особенности	2
Цель работы	2
Методы	3
Данные	3
Обработка	3
Изотоническая регрессия	5
Результаты	6
Появление льда	6
Исчезновение льда	7
Ледовый период	8
Верификация	9
Появление льда	10
Исчезновение льда	11
Ледовый период	12
Площадь льда	13
Факторы окружающей среды	14
Температура воздуха	15
Появление льда	15
Исчезновение льда	16
Ледовый период	17
Площадь льда	18
Заключение	19

Введение

Ледовый покров

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

Ледовые фенокарты

Характеристики

Единицы измерения – даты, дни с начала года

Сроки появления льда:

- Образование льда
- Импорт полей льда

Сроки исчезновения льда:

- Таяние льда
- Экспорт полей льда

Особенности

Pros:

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

Cons:

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

Цель работы

Цель

Оценить пространственно-временную динамику ледовой фенологии Каспийского моря

Задачи

- Оценить эффективность полученных результатов
- Выявить и обосновать причины изменений фенологических характеристик

Методы

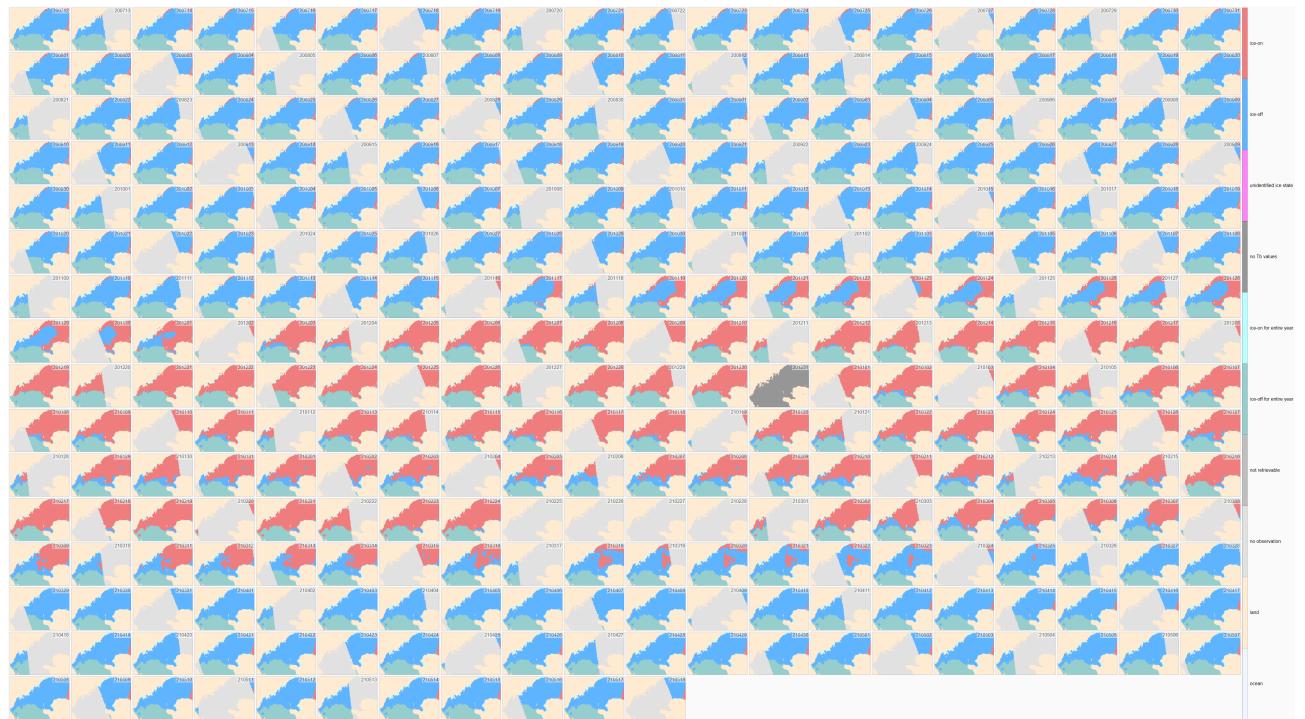
Данные

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

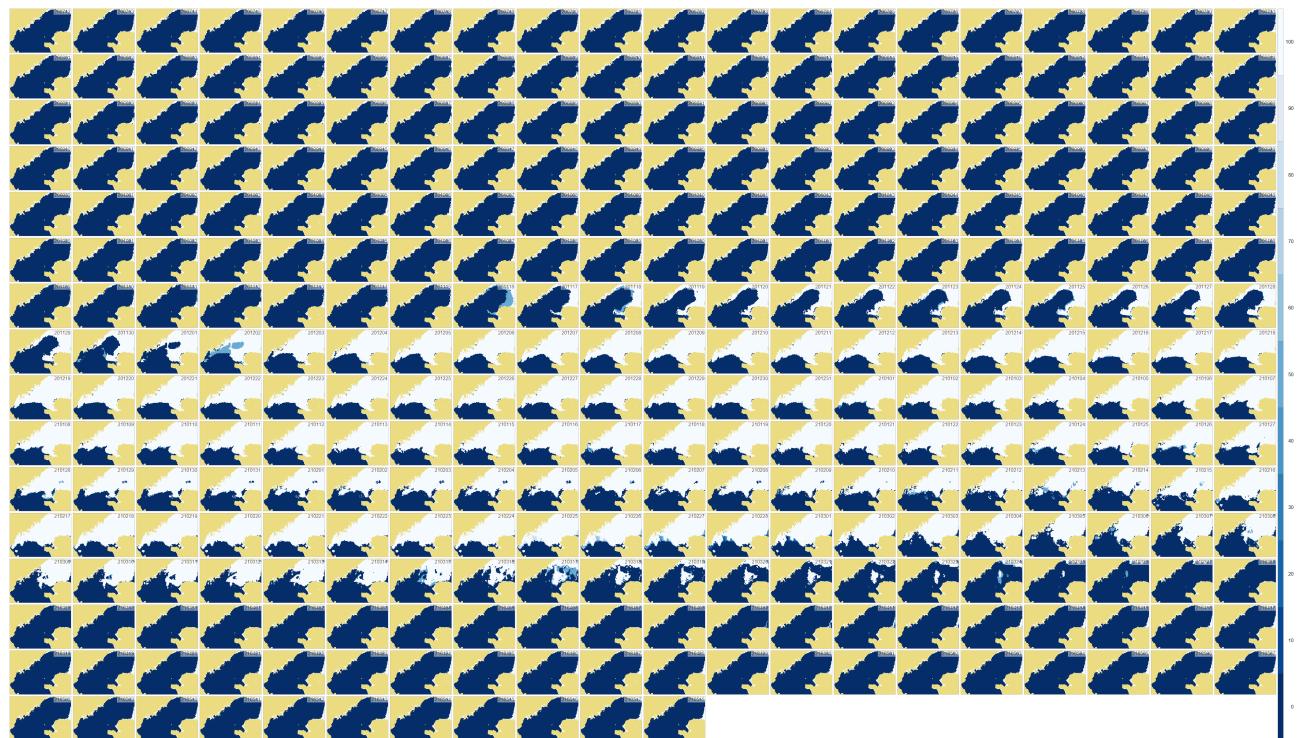
Обработка

- Преобразование из номинальной шкалы (категории льда) в интервальную (сплоченность льда)
- Заполнение пропусков в данных
 - Пространственная экстраполяция¹
 - Временная экстраполяция
- Выделение района исследований (постобработка)

¹ В данной работе – не кригинг



Номинальная шкала (категории льда)



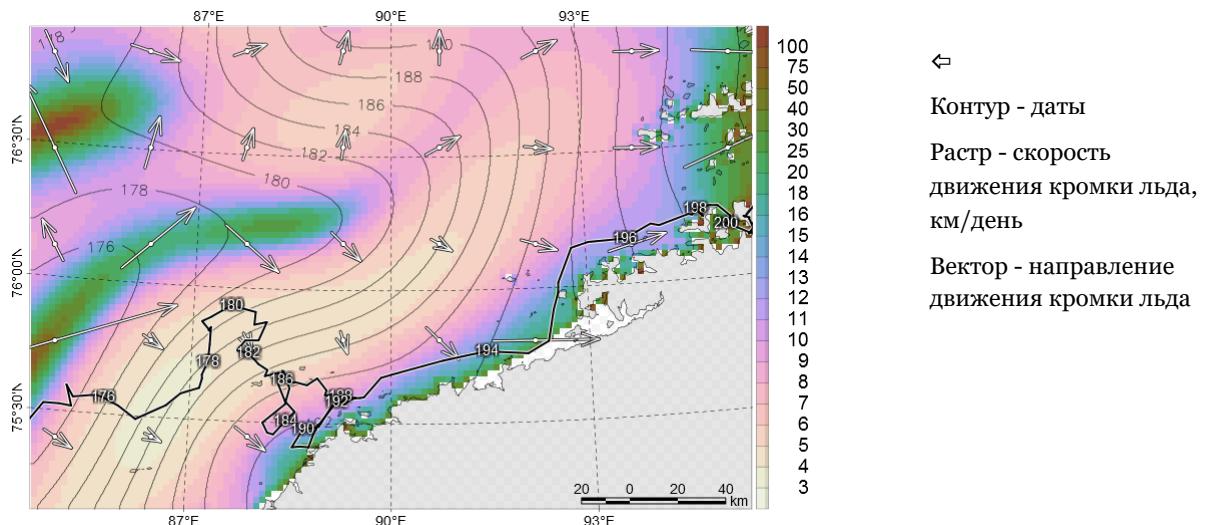
Интервальная шкала (сплошность льда)

Изотоническая регрессия

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

Предшественник:

- Аппроксимация асимптотическими функциями Гомперца и несимметричной Гаусса (Рожнов и др., 2017).



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:

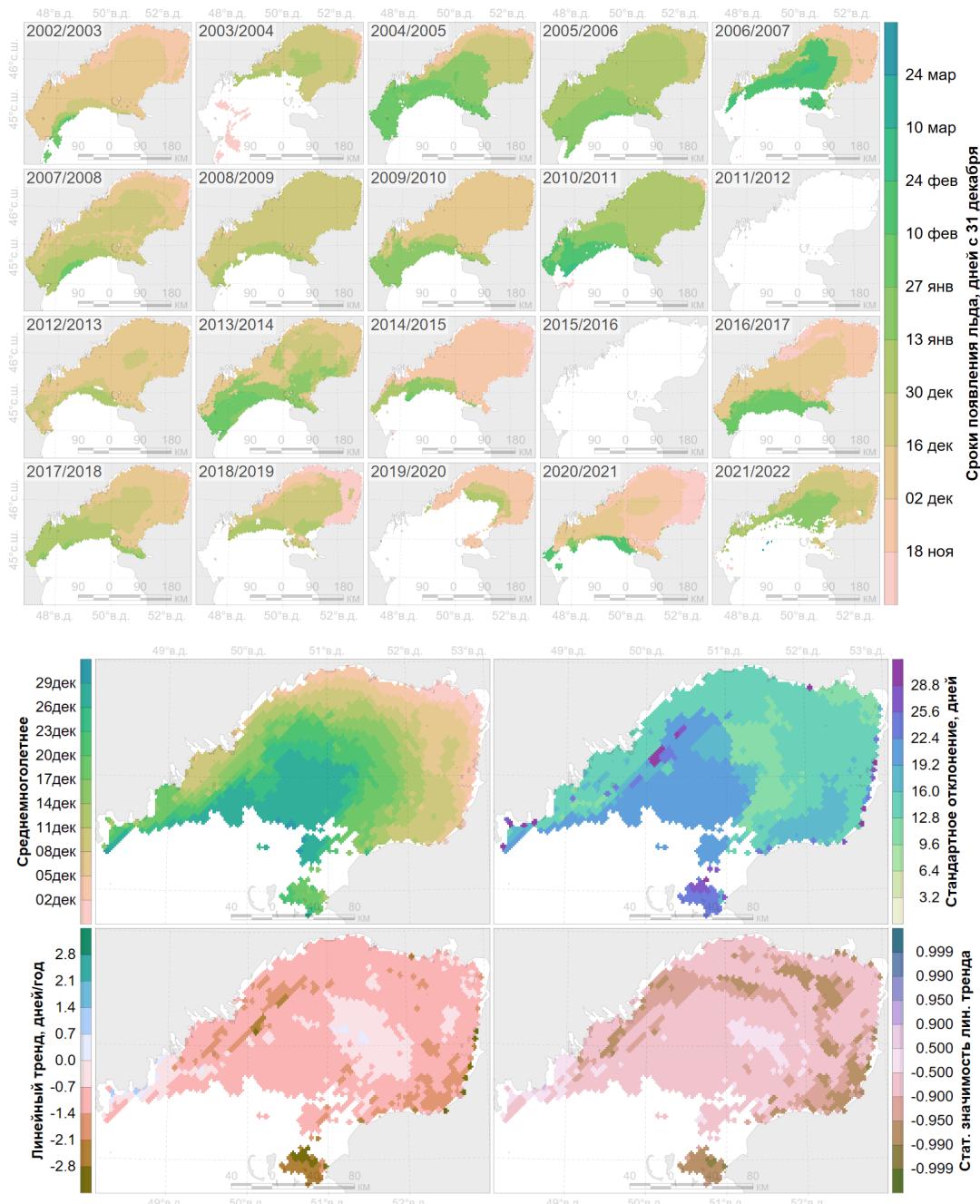
- Сумма квадратов отклонений (как в линейной регрессии)

Выбор сценария:

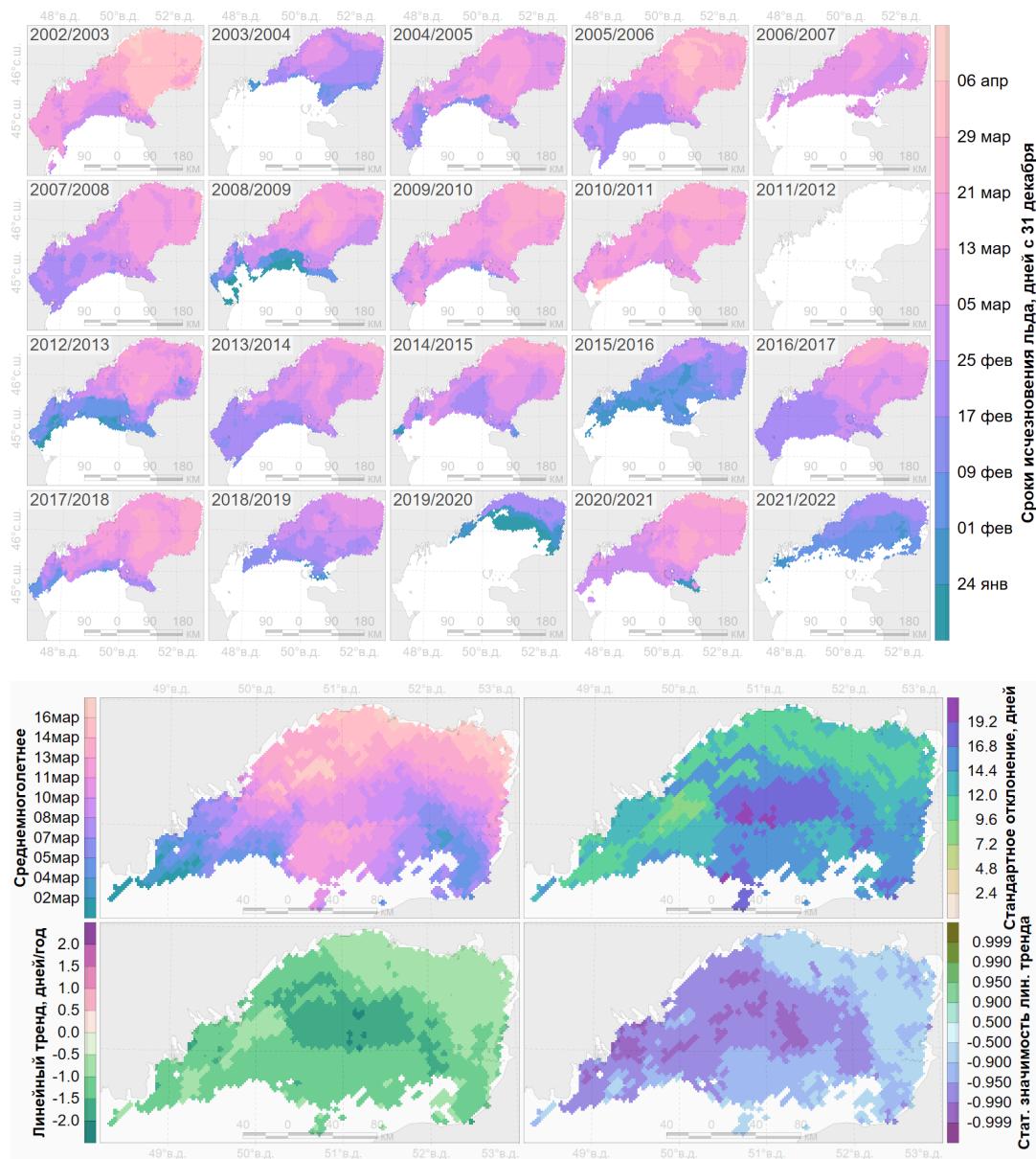
- Минимальная сумма квадратов отклонений.

Результаты

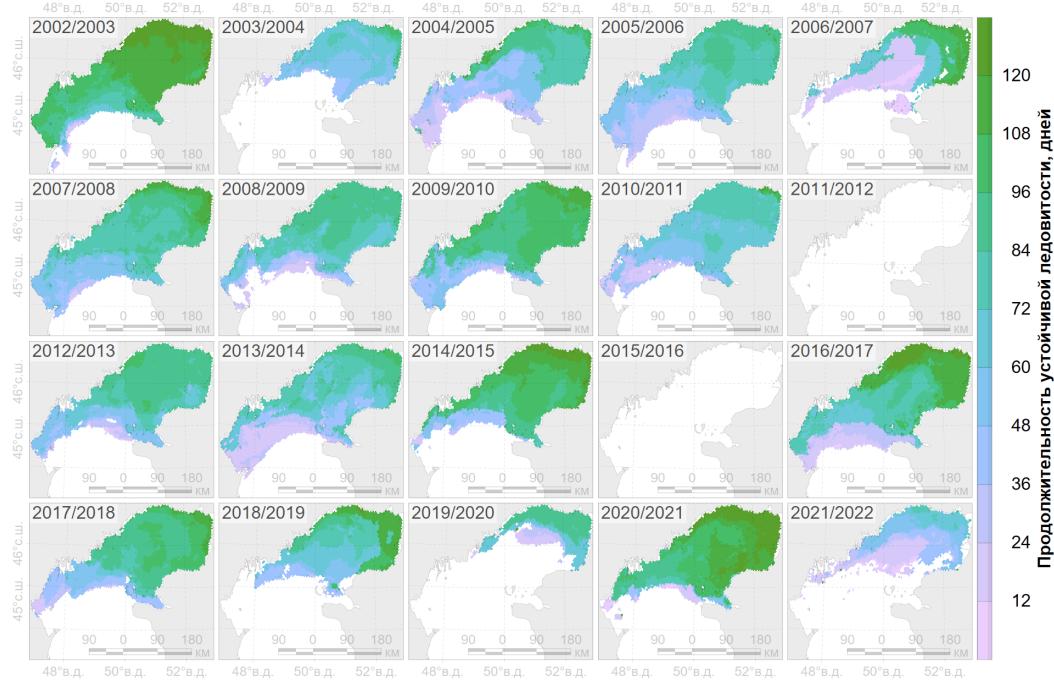
Появление льда



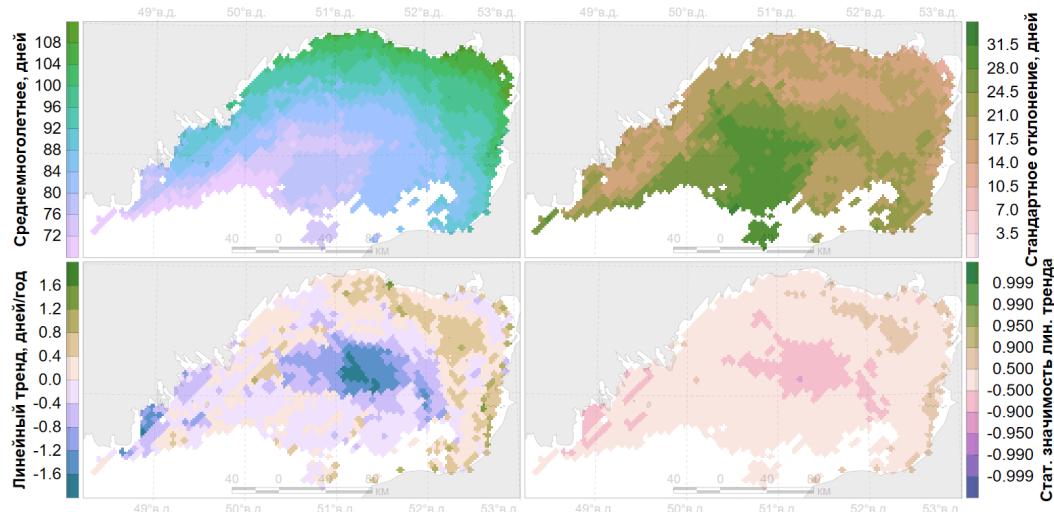
Исчезновение льда



Ледовый период



По фенокартам появления и исчезновения льда.



Верификация

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.

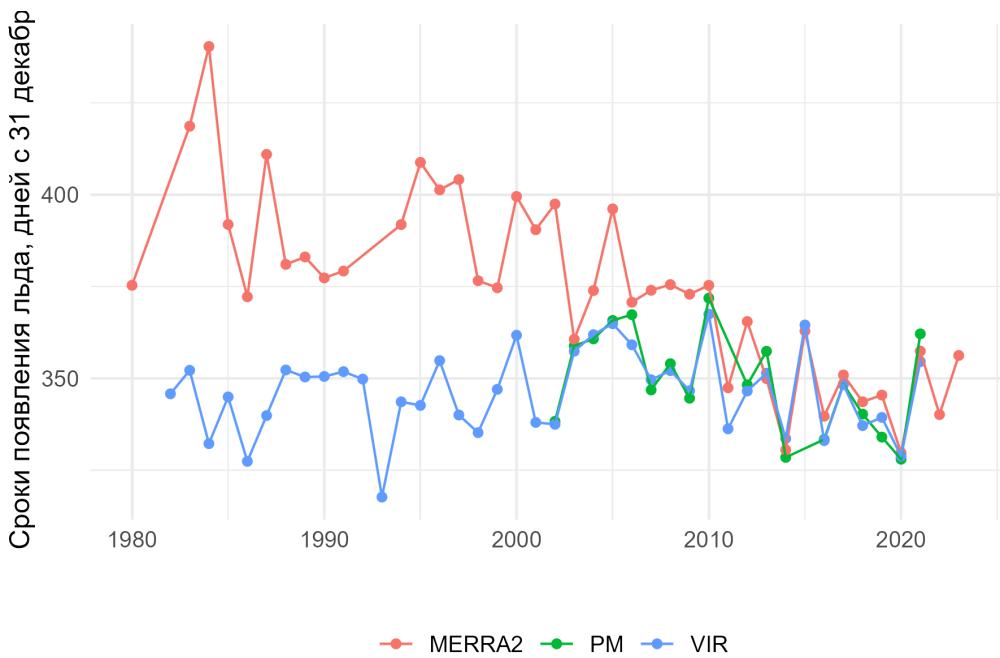
VIR (visual, infrared) – оптический и ИК диапазоны

- 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 et al., 2017](#))
 - Пространственное разрешение 5км \times 5км
 - Временное разрешение: 1 сутки
 - Временной охват: 2002-06-06 - 2011-10-03, 2012-07-24 - 2022-12-31

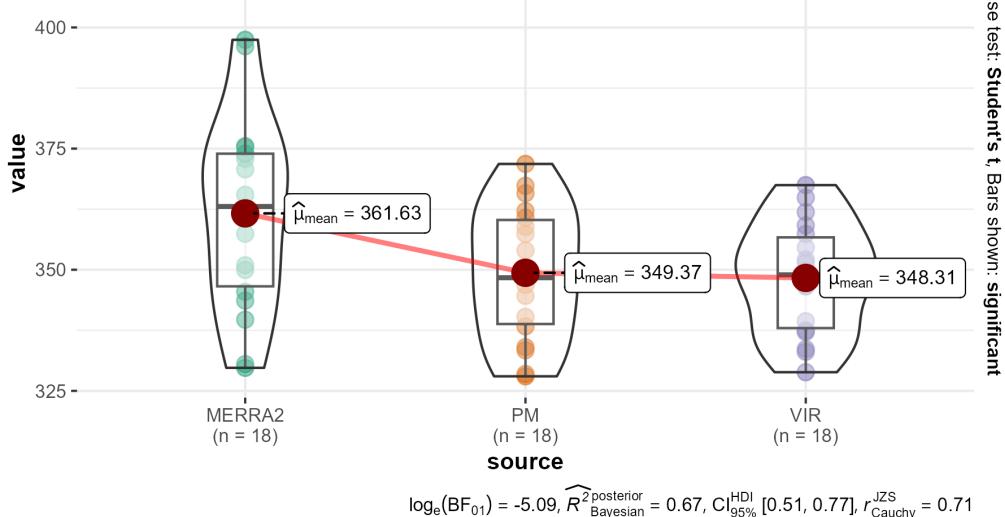
Появление льда



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)

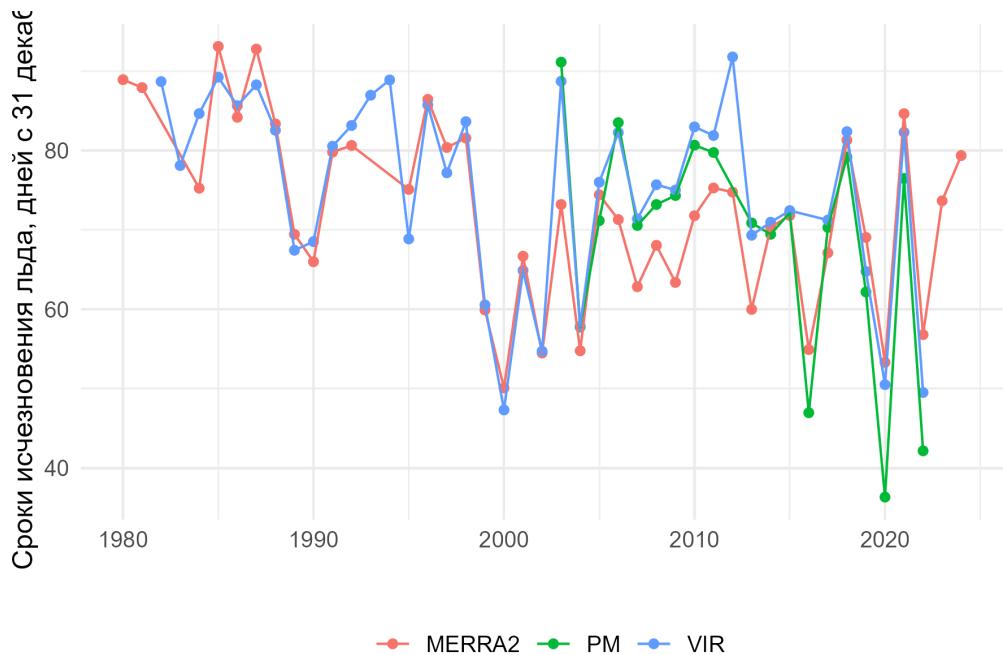
$$F_{\text{Fisher}}(1.08, 18.43) = 11.45, p = 2.71e-03, \widehat{\omega_p^2} = 0.12, \text{CI}_{95\%} [0.00, 1.00], n_{\text{pairs}} = 18$$

$$\begin{array}{c} p_{\text{Holm-adj.}} = 5.8/e^{-0.3} \\ \hline \hline p_{\text{Holm-adj.}} = 0.01 \end{array}$$

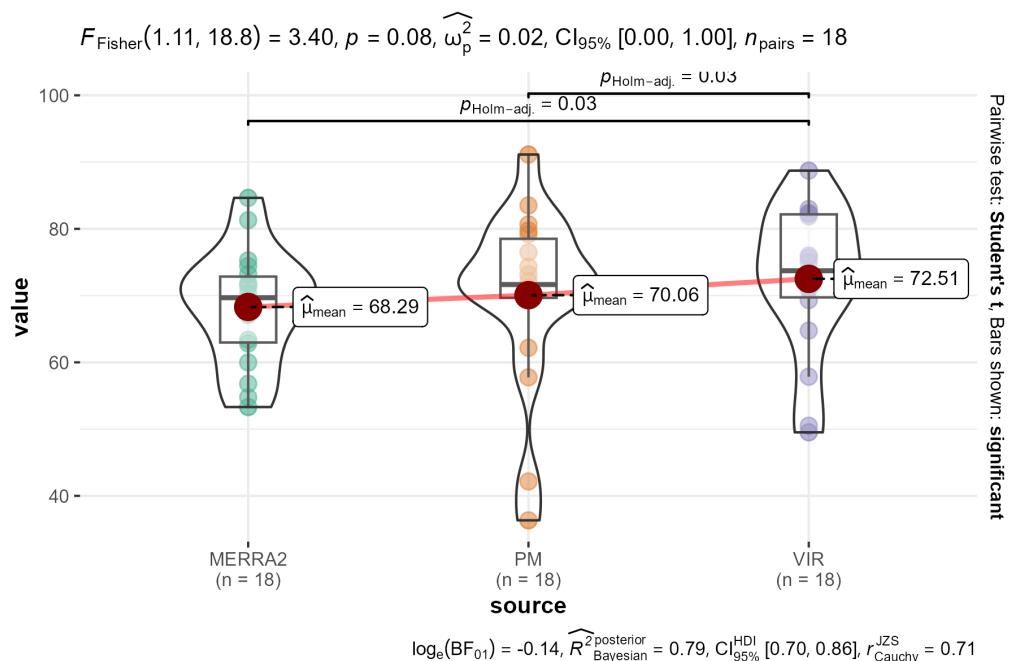


$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9691$$

Исчезновение льда

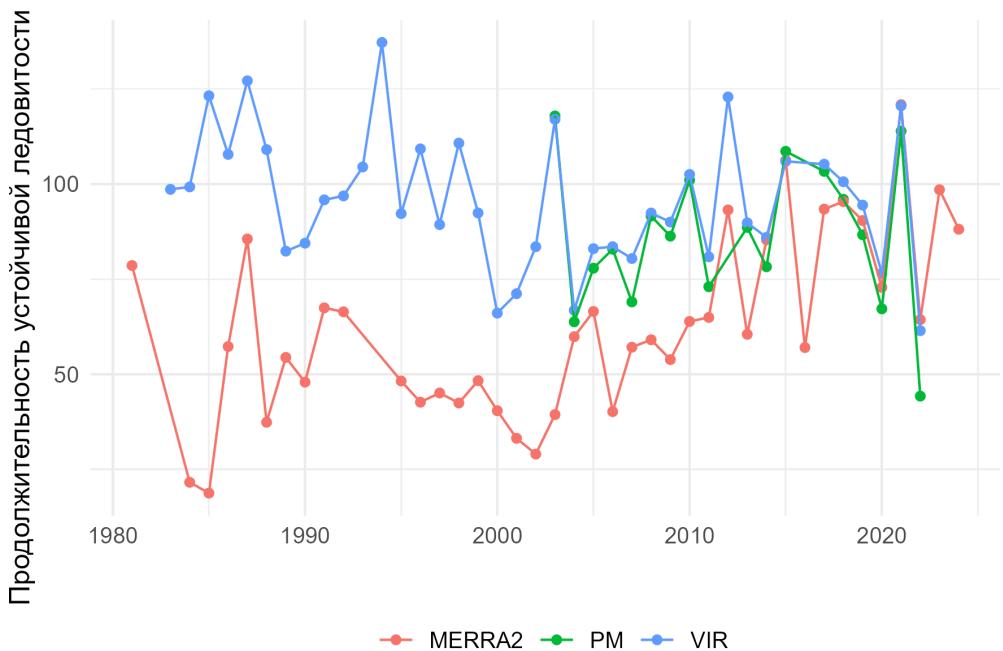


data	min	max	avg	slope	obs
PM	05Feb (2020)	01Apr (2003)	11Mar±13.5	-1.1±0.5 (S=0.97)	20 (2003-2022)
MERRA2	22Feb (2020)	26Mar (2021)	09Mar±8.6	+0.0±0.3 (S=0.10)	20 (2003-2022)
VIR	19Feb (2022)	30Mar (2003)	14Mar±11.1	-0.7±0.4 (S=0.91)	20 (2003-2022)
MERRA2	19Feb (2000)	03Apr (1985)	13Mar±11.3	-0.4±0.1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

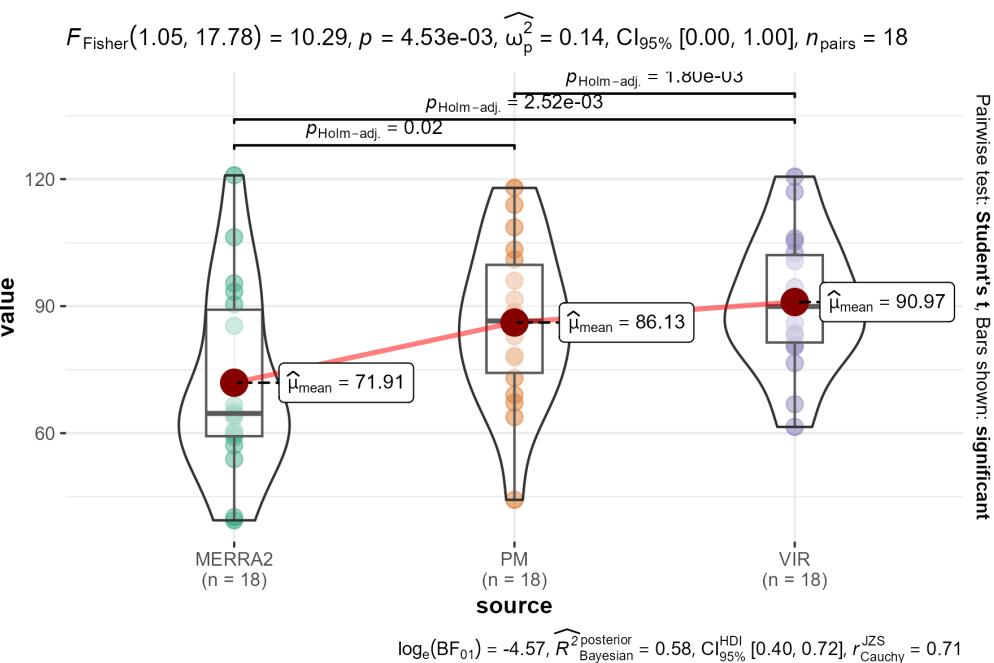


$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9712$$

Ледовый период

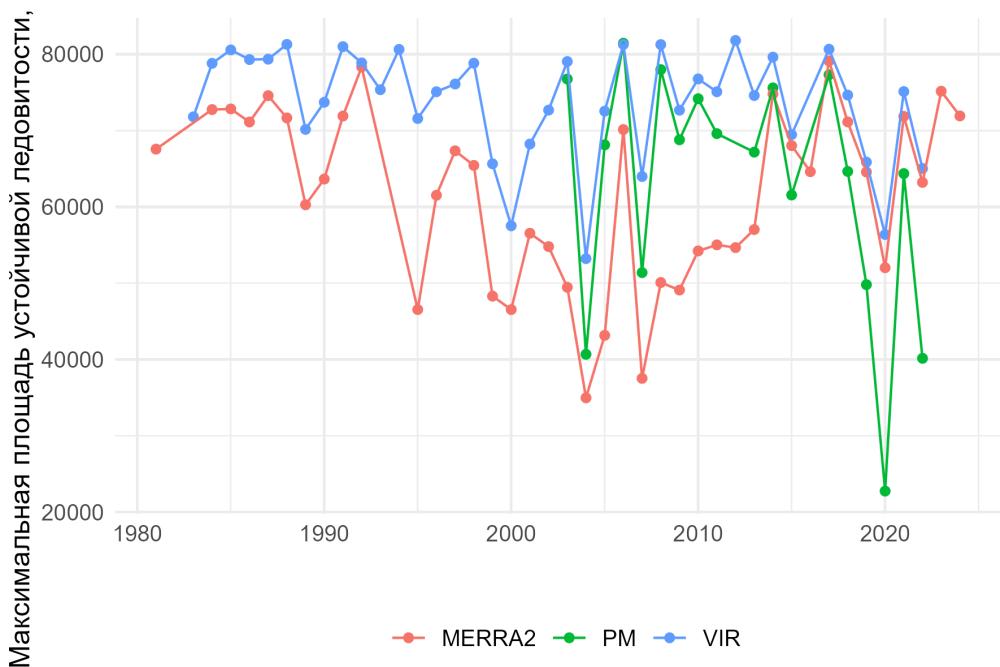


data	min	max	avg	slope	obs
PM	44 (2022)	118 (2003)	86±19	-0.2±0.8 (S=0.16)	20 (2003-2022)
MERRA2	39 (2003)	121 (2021)	72±22	+2.6±0.6 (S>0.999)	20 (2003-2022)
VIR	61 (2022)	121 (2021)	91±16	+0.2±0.6 (S=0.26)	20 (2003-2022)
MERRA2	19 (1985)	121 (2021)	62±24	+1.1±0.2 (S>0.999)	44 (1981-2024)
VIR	61 (2022)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

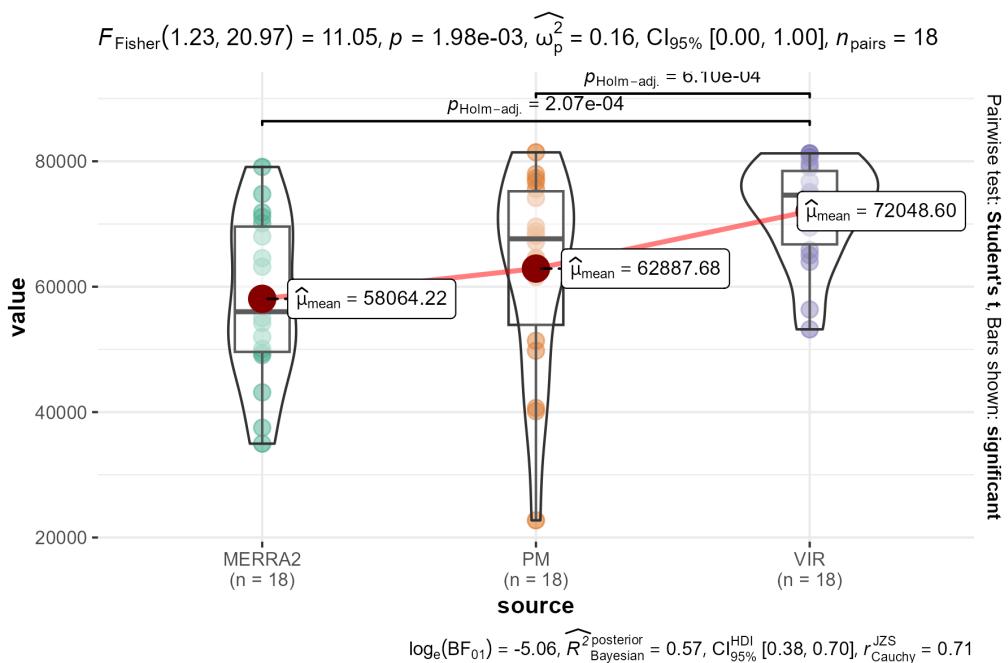


$$\rho(\text{VIR}, \text{PM}) = 0.9776$$

Площадь льда



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)



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

Факторы окружающей среды

Параметры

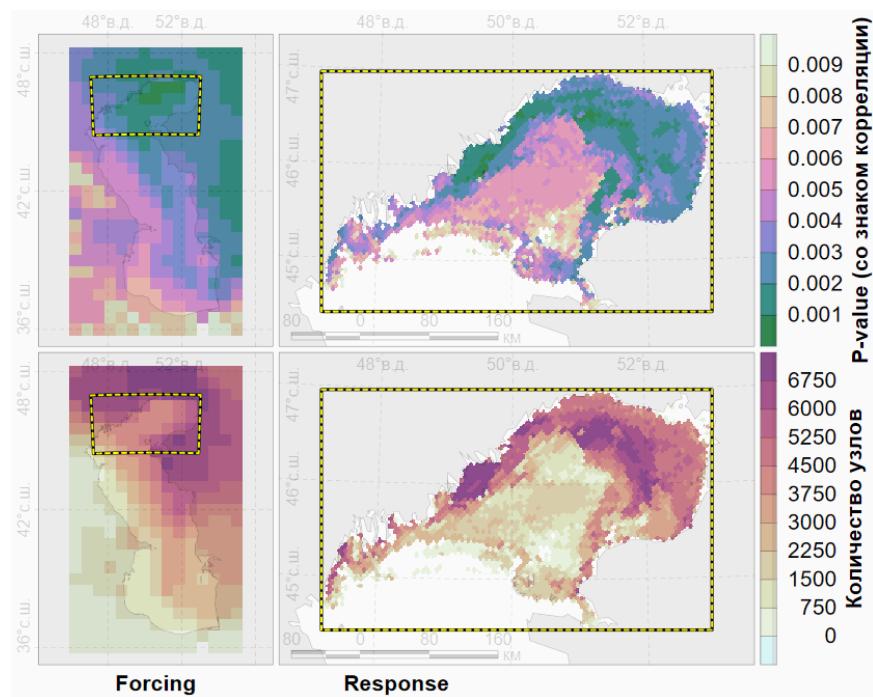
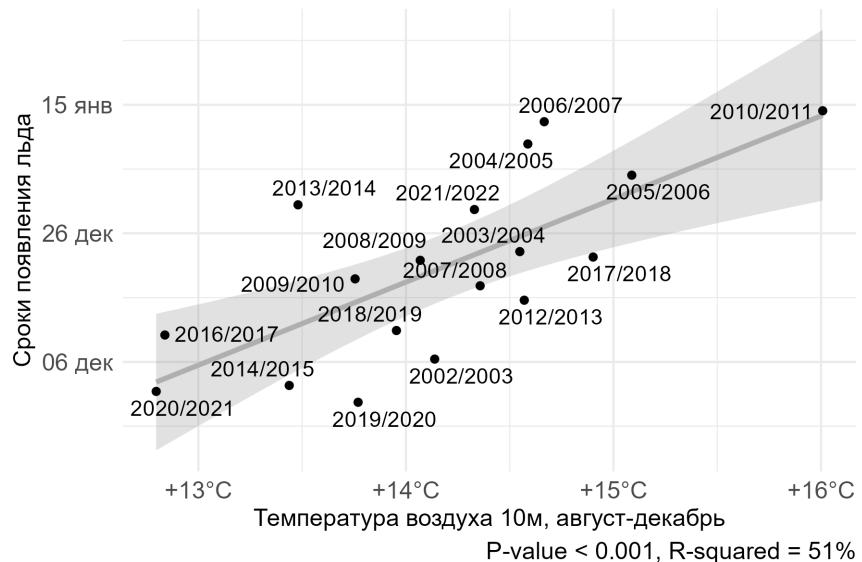
- Пространственные данные
 - Температура воздуха ([Global Modeling And Assimilation Office, 2015](#))
 - Скорость меридианного и зонального ветра ([Global Modeling And Assimilation Office, 2015](#))
 - Температура воды ([Lopez, 2019](#))
- Точечные данные:
 - Уровень моря ([Copernicus Climate Change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

Методы

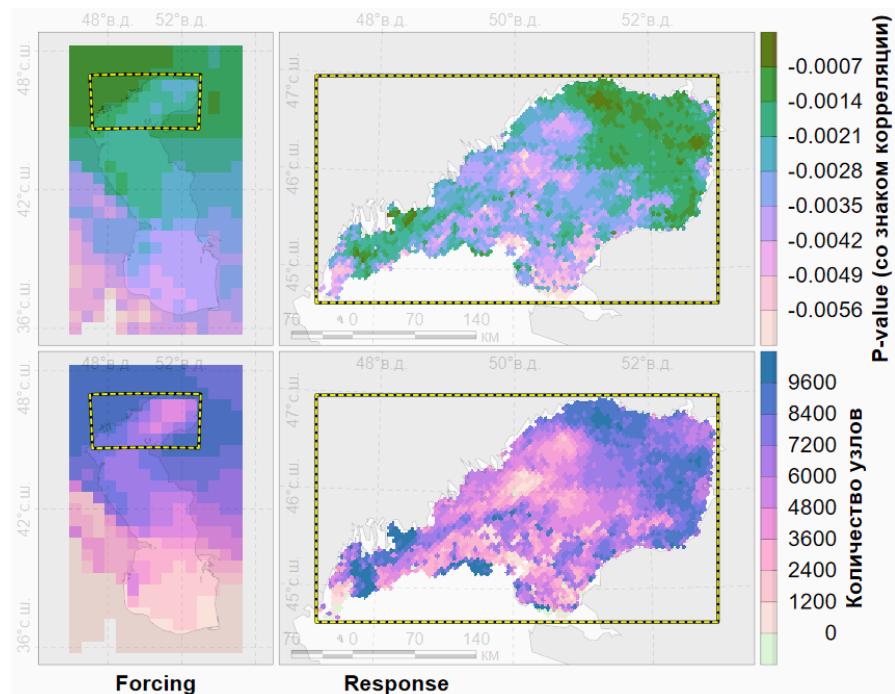
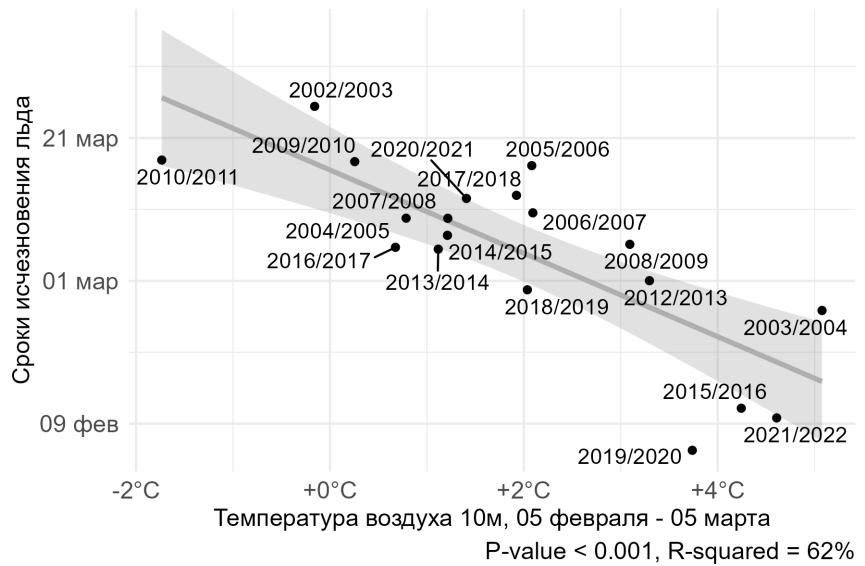
- Регрессионный анализ сводных характеристик
- Корреляционный анализ региональных связей

Температура воздуха

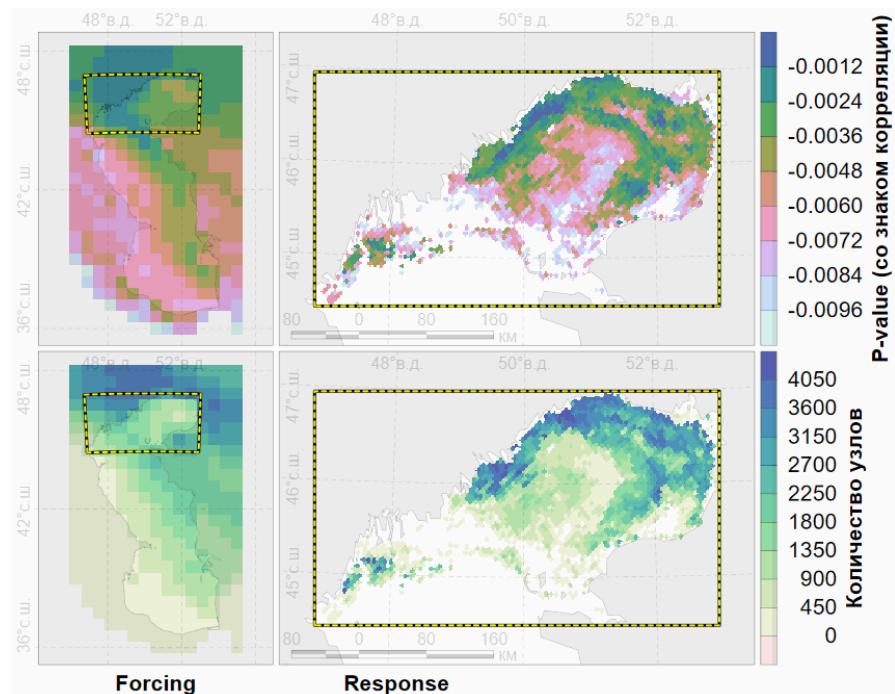
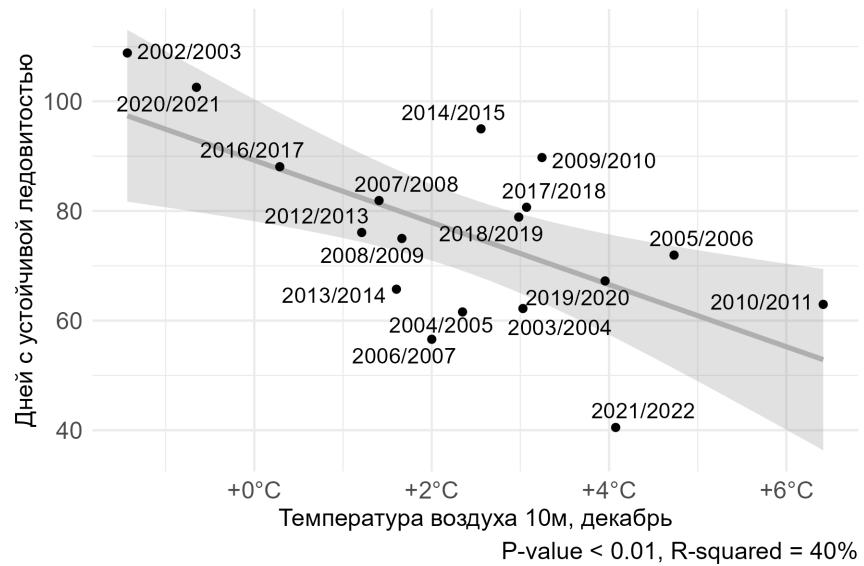
Появление льда



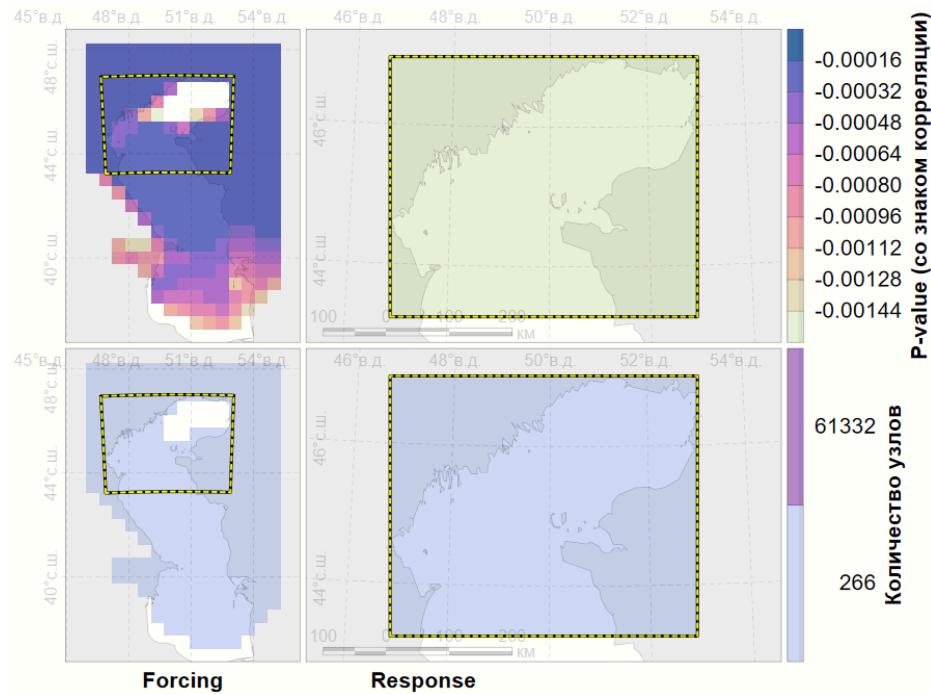
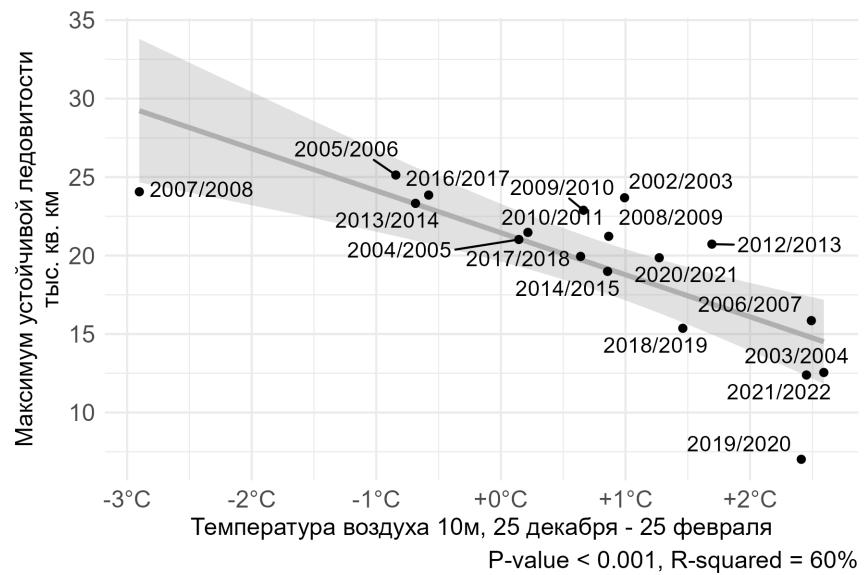
Исчезновение льда



Ледовый период



Площадь льда



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.

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

- Рожнов ВВ, Платонов НГ, Найденко СВ, Мордвинцев ИН и Иванов ЕА. 2017. Перемещение самки белого медведя в Карском море в период летнего таяния льда. *Доклады Академии наук*, (3): 359–363. Академцентр "Наука". [10.7868/S0869565217030276](https://doi.org/10.7868/S0869565217030276).
- Copernicus Climate Change Service. 2020. Lake water levels from 1992 to present derived from satellite observations. ECMWF. [10.24381/CDS.5714C668](https://doi.org/10.24381/CDS.5714C668).
- Du J, Kimball J and Duguay C. 2017. Daily Lake Ice Phenology Time Series Derived from AMSR-E and AMSR2. Версия 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. (accessed 27 January 2024). [10.5067/HT4NQO7ZJF7M](https://doi.org/10.5067/HT4NQO7ZJF7M).
- 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. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Greenbelt, MD, USA. Maintained by Steven Pawson. (accessed 23 October 2024). [10.5067/Y67YQ1L3ZZ4R](https://doi.org/10.5067/Y67YQ1L3ZZ4R).
- Lopez A. 2019. Sea surface temperature daily data from 1981 to present derived from satellite observations. ECMWF. (accessed 24 October 2024). [10.24381/CDS.CF608234](https://doi.org/10.24381/CDS.CF608234).
- Turner TR and Wollan PC. 1997. Locating a maximum using isotonic regression. *Computational Statistics & Data Analysis*, 25(3): 305–320. Elsevier BV. [10.1016/s0167-9473\(97\)00009-1](https://doi.org/10.1016/s0167-9473(97)00009-1).

© 2024 Платонов Н. Г., Соловьёва М. А., Рожнов В. В.. Ледовая фенология
Каспийского моря. Международная научная конференция
«Каспийский тюлень: индикатор состояния каспийской экосистемы»,
Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, г. Махачкала.