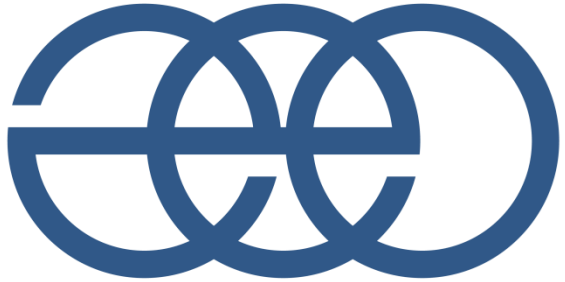
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
Российской академии наук



основан в 1918 году

Возможности дистанционного зондирования для выявления и картографирования пропарин в ледовом покрове озера Севан

Медведев А.А.*, Овсепян А.А., Асмарян Ш.Г.**, Айвазян Г.М.*, Мельников М.Г.***

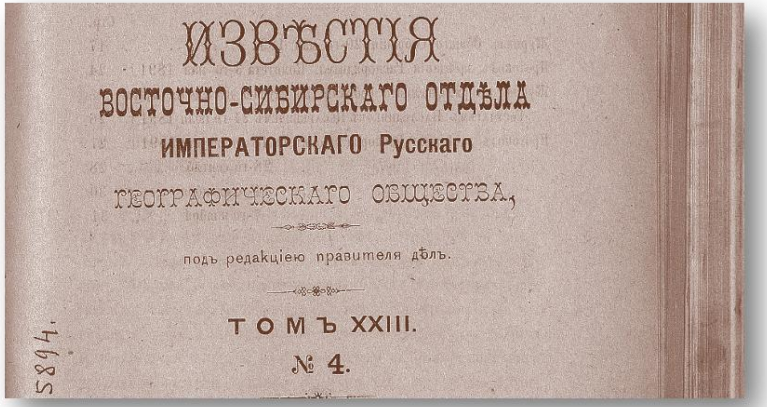
*Отдел картографии и дистанционного зондирования Земли

**Центр эколого-ноосферных исследований НАН РАН

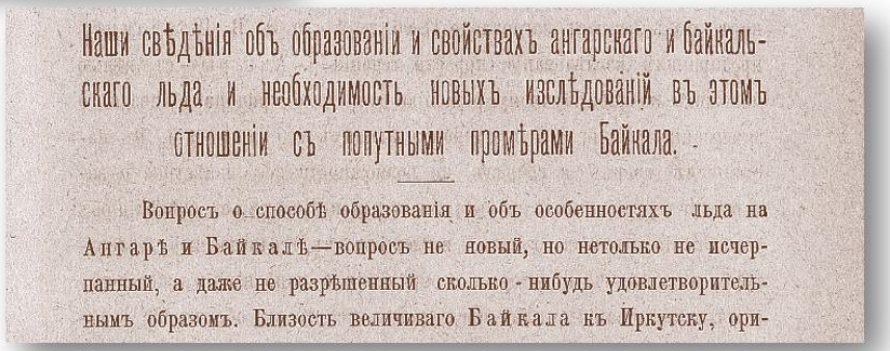
Институт географии, Российская Академия Наук

Пропарины

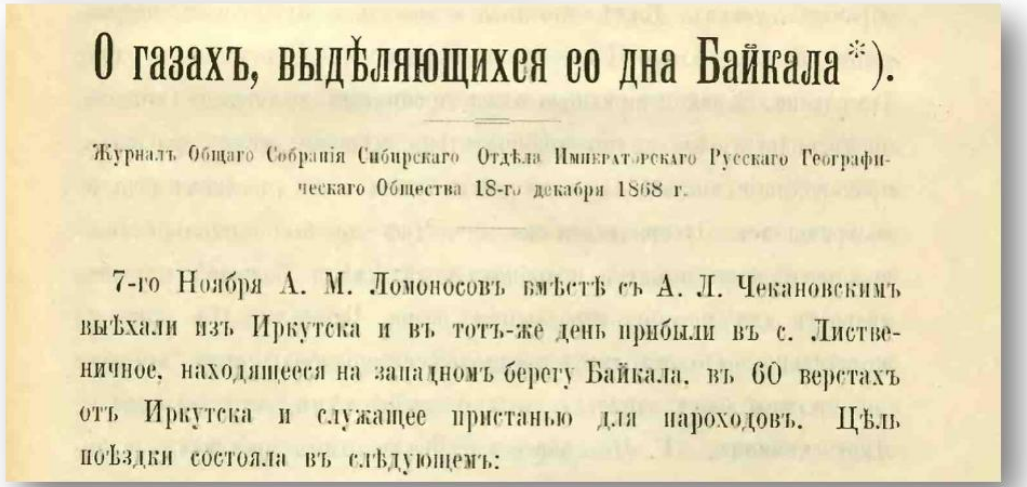
В начале XX века **академик В. Обручев** писал: «*Еще задолго до полноговзламывания льда появляются на Байкале голые места, носящие у местных жителей характерное название* ***пропарин*** *и образующиеся, по ихмнению, вследствие действия теплых подводных ключей … сейчас жепосле покрытия озера льдом, когда лед еще очень тонок, на местахбудущих пропарин подо льдом собираются большие* ***пузыри воздуха(газа)****.*»


ИЗВѢСТІЯ
ВОСТОЧНО-СИБИРСКАГО ОТДѢЛА
ИМПЕРАТОРСКАГО Русскаго
ГЕОГРАФИЧЕСКАГО ОБЩЕСТВА.
подъ редакціею правителя дѣлъ.
ТОМЪ XXIII.
№ 4.


БАЙКАЛЬСКІЙ СБОРНИКЪ
ВЫПУСКЪ 1-Й.
Съ 2 картами и 4 чертежами.


Наши свѣдѣнія объ образованіи и свойствахъ ангарскаго и байкальскаго льда и необходимость новыхъ изслѣдованій въ этомъ отношеніи съ попутными промѣрами Байкала.

Вопросъ о способѣ образованія и объ особенностяхъ льда на Ангарѣ и Байкалѣ—вопросъ не новый, но нетолько не исчерпанный, а даже не разрѣшенный сколько-нибудь удовлетворительнымъ образомъ. Близость величиваго Байкала къ Иркутску, ори-


О газахъ, выдѣляющихся со дна Байкала*).

Журналъ Общаго Собранія Сибирскаго Отдѣла Императорскаго Русскаго Географическаго Общества 18-го декабря 1868 г.

7-го Ноября А. М. Ломоносовъ вмѣстѣ съ А. Л. Чекановскимъ выѣхали изъ Иркутска и въ тотъ-же день прибыли въ с. Лиственичное, находящееся на западномъ берегу Байкала, въ 60 верстахъ отъ Иркутска и служащее пристанью для пароходовъ. Цѣль поѣздки состояла въ слѣдующемъ:

Институт географии, Российская Академия Наук

Пропарины

Пропарина (син. промоина) - небольшой открытый участок воды, образующийся в ледяном покрове под влиянием сильного течения, а также в местах поступления теплых вод. Пропарина отличается от полыньи тем, что образуется уже после установления ледяного покрова. *(Гляциологическийсловарь / Ред . В.М. Котляков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 528 с.)*

По **В.М. Сокольникову** (1957) — все пропарины делятся по причине подтока тепла к нижней поверхности льда на пять типов:

- **Газовые** — газ, поднимающийся со дна (метан из донных отложений, грязевыхвулканов, сипов), увлекает за собой более тёплую глубинную воду и подтаиваетлёд снизу. Самый известный тип на Байкале.
- **Термальные** — разгрузка горячих подземных вод (на Байкале это богатыйминеральными солями термокарст в зонах разломов, связанный с Байкальскимрифтом).
- **Теченевые** — течения подносят к нижней кромке льда сравнительно тёплую воду изглубины.
- **Речные (приустьевые)** — тепло речных вод в местах впадения притоков.
- **Комбинированные** — сочетание нескольких факторов.

• *Сокольников В.М. Причины, обуславливающие образование пропарин (ключей) в ледяномпокрове Байкала // Тр . Байкальской лимнологической станции . Т . XV . М . Л .: Изд-во АН СССР, 1957 . С . 65–94*

Институт географии, Российская Академия Наук

Пропарины

Образование газовых и купольных пропарин:

1. **Накопление газа.** После ледостава газ (бактериальный или термогенный метан, воздухоподобные смеси из тающих нижних слоёв льда) не может выйти в атмосферу. Он накапливается на границе «вода–лёд» и вмерзает в лёд; концентрация газов во льду достигает 1–2 %, что соответствует поступлению порядка 0,1 л/м² в сутки.
2. **Формирование купола.** Газ растекается под льдом и собирается к центру; лёд надним деформируется в купол с уклоном порядка 5 см на 100 м. Толщина льда в центре купола меньше, чем на периферии.
3. **Локальный разогрев.** Тепло из донных слоёв водоёма подогревает воду, но газовая подушка работает как теплоизолятор — тепло «запирается» у нижней поверхности льда.
4. **Потеря устойчивости и циркуляция.** При разогреве верхнего слоя воды меняется её плотность, столб воды становится неустойчивым, возникает вертикальное перемешивание. Тёплая вода плюс движение газовых пузырей резко усиливают таяние льда над газовым каналом.
5. **Прорыв.** Образуется узкий канал, по которому пузыри поднимаются в пропарину; лёд над каналом истончается и прорывается — возникает «колодец» с крутыми стенками размером 2×3 м и более.

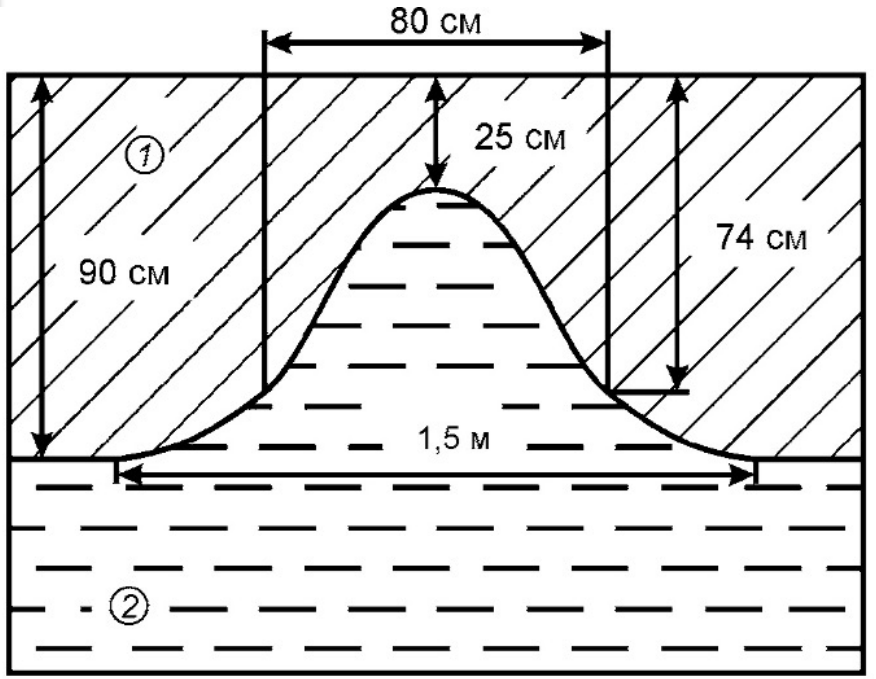


Рис. 4. Сечение ледяного покрова в области канала, по которому газ поступал в пропарину (расстояние от данного сечения до пропарины около10 м):
1 – ледяной покров; *2* – вода

•Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. №3. С. 150–161.

•Гунин В.И. Оценка воздействия газо-гидротермальной деятельности Байкальского рифта на акваторию озера по результатам численного эксперимента. *Геодинамика и тектонофизика*. 2014;5(3):763-775. https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0153

•Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Особенности структуры пропарины в ледяном покрове, образованной выходами газа. *Лёд и Снег*. 2018;58(3):405-416. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-405-416

Институт географии, Российская Академия Наук

Объект исследования

Озеро Севан, Армения

≈ 1 240 км²
площадь водной поверхности

≈ 83 м
максимальная глубина

≈ 1 900 м
высота над уровнем моря

≈ 74 км
протяжённость озера

- располагается в восточной части Армении, Гегаркунинской области
- тектоно-вулканическое происхождение
- две котловины: Малый и Большой Севан
- максимальная глубина Большого Севана ≈ 35 м, Малого ≈ 83 м
- в озеро впадают 28 рек, вытекает одна – Раздан



Площадь, уровень и объём озера меняются со временем
Источники: Shikhani et al., 2024; Sahakyan et al., 2025; Hovsepyan et al., 2025

Институт географии, Российская Академия Наук

Актуальность, цель и задачи

Актуальность

- Оценка водного баланса
  выявление скрытых источников поступления подземных вод
- Оценка выбросов парниковых газов в атмосферу
  выявление потенциальных источников эмиссии метана в атмосферу
- Изучение геологических процессов
  определение участков дегазации и гидрогеологической активности
- Выявление зон потенциально опасного деградации ледового покрова
  дистанционная оценка чрезвычайно мелкой плотности льда
- Локальные нарушения льда помогают выбрать участки для подводного обследования

Цель

Оценка возможности и ограничений данных дистанционного зондирования для детектирования участков дегазации и зон разгрузки подземных вод на основе анализа ледового покрова

Задачи

- Произвести сбор данных и первичную обработку
- Выполнить анализ условий становления ледового покрова и хронологии его становления
- Произвести сегментацию мест нарушения ледового покрова, как потенциальных зон дегазации
- Произвести сравнение разновременных данных
- Оценить применимость данных ДЗЗ на пропаринах разного размера

Институт географии, Российская Академия Наук

Условия образования ледяного покрова

Температура воздуха

≤ –5,6 °C

средняя за период декабрь – февраль

Безветренная погода в феврале

> 100 часов

продолжительность спокойной погоды

- Лёд у берегов образуется практически ежегодно; сплошной покров — не каждый год.
- Первый лёд: ноябрь – январь; вскрытие озера: конец марта – начало апреля.
- **Толщина льда в центральной части при сплошном покрове: 30–35 см.**

Институт географии, Российская Академия Наук

Причина изменений теплового режима

–18,8 м

снижение уровня воды в озере

–42,2 %

уменьшение объёма воды

- **Изменения привели к трансформации теплового режима озера (по данным Ованнисяна):**
  - – быстрый прогрев воды в весенне-летний период;
  - – быстрое охлаждение осенью.
- **Снижение теплоёмкости озера:**
  - – 700×10^{12} ккал (до снижения уровня) → 500×10^{12} ккал (после)

Итог: озеро стало «менее инерционным» — быстрее нагревается весной и быстрее замерзает зимой.

Институт географии, Российская Академия Наук

Полное и обширное замерзание озера

До понижения уровня (редкое явление):

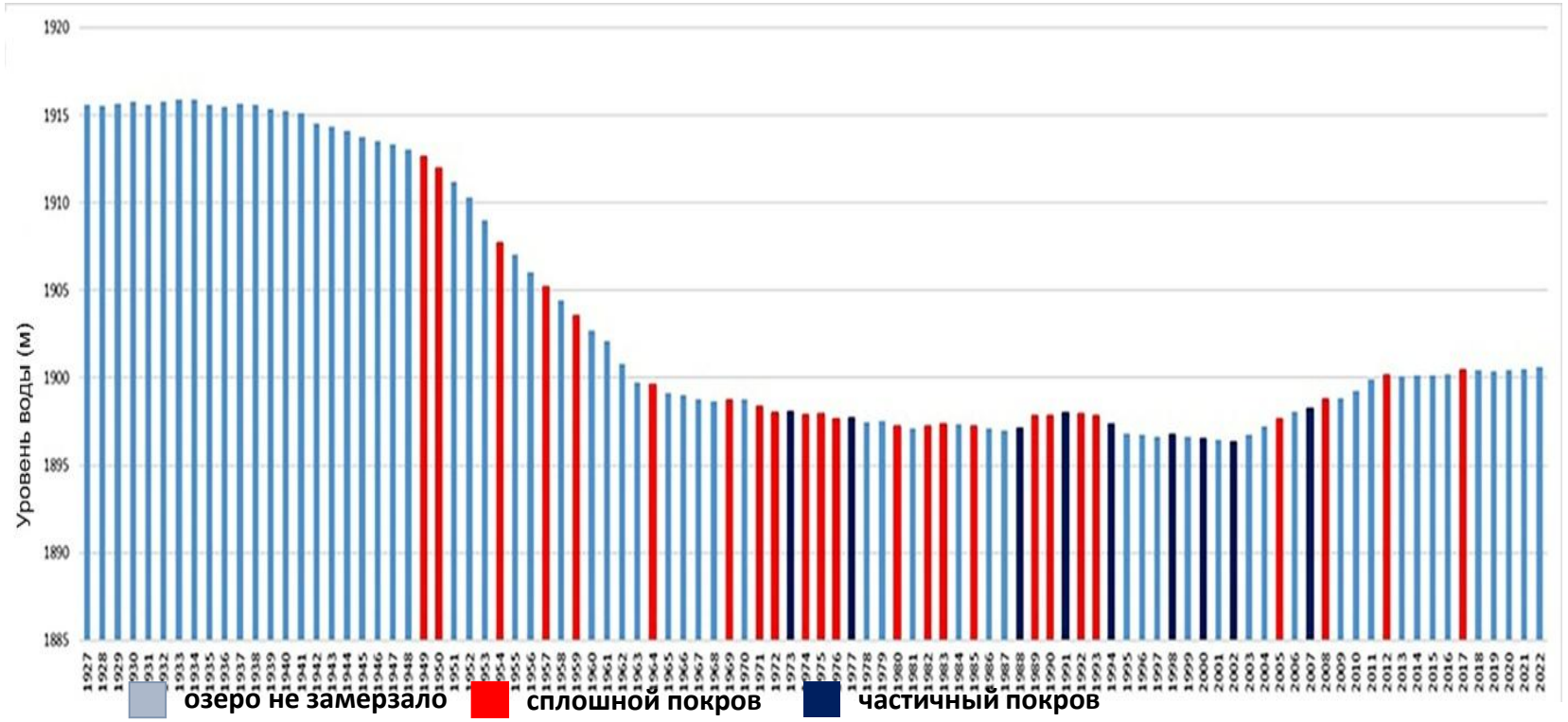
1834 1846 1864 1873 1890
1905 1925

После понижения уровня 1933–2025 (сплошной покров):

1949 1950 1954 1957 1959 1964
1969 1971 1972 1974 1975 1976
1980 1982 1983 1985 1989 1990
1992 1993 2005 2008 2012 2017

После понижения уровня 1933–2025 (частичный покров - только Большой Севан):

1973 1977 1988 1991 1994
1998 2000 2002 2007



Замерзание озера Севан в период 1927-2022гг.

Институт географии, Российская Академия Наук

Частота замерзания по декадам



Пик обширного заледенения — 1970-е и 1980-е (по 5 зим за декаду). С 2020 по 2025 год озеро не замерзало.

Институт географии, Российская Академия Наук

Рекорды ледового покрова

Самое раннее замерзание

14 января 2008 г.

самый ранний старт процесса замерзания по данным наблюдений Центра

Самый продолжительный ледяной покров

≈ 85 дней

рекордная продолжительность заледенения — 1972 год

Источник данных: Центр гидрометеорологии и мониторинга Министерства окружающей среды Республики Армения (armmonitoring.am)

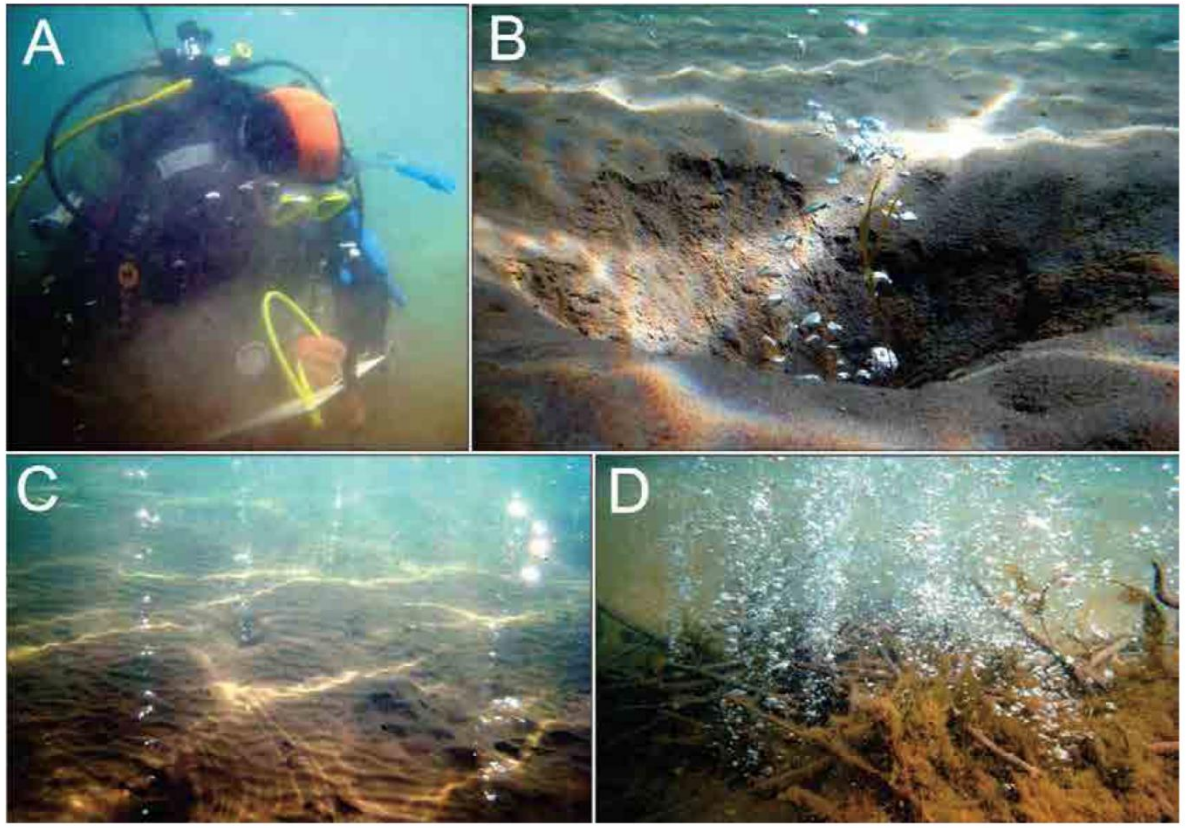
Институт географии, Российская Академия Наук

Дегазация озера

Газовые пробы оз. Севан, 2018 г.

Район	Проба	Доминирующий газ
Северо-восток Малого Севана	4V/18	CH_4 75,56%
Юго-запад Севана	5V/18 и 6V/18	CO_2 95,19–95,99%

- происхождение газа отличается между районами
- ДДЗ не позволяют определить природу конкретных ледовых аномалий



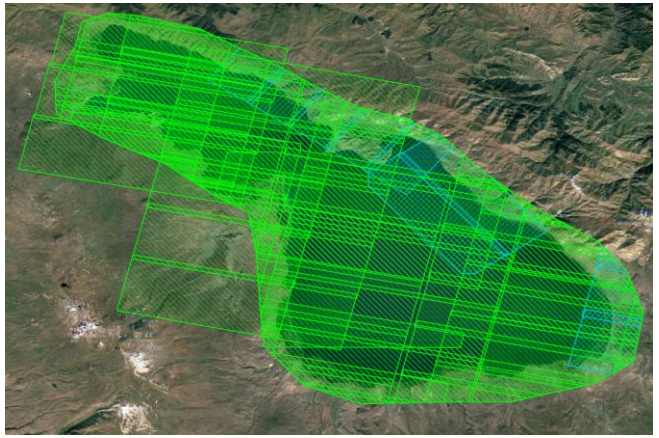
Процесс дегазации озера Севан

Источник:
- Avagyan, Ara & Sahakyan, et al.. (2020). New evidences of Holocene tectonic and volcanic activity of the western part of Lake Sevan (Armenia). Geological Quarterly. 0-000. 10.7306/gq.1530.
- Avagyan, Ara & Meliksetian, et al. (2021). The basis of the geohazards geopark creation of the Republic of Armenia

Институт географии, Российская Академия Наук

Данные

Источник	Объем данных	Роль
PlanetScope	80 сцен, 12 дат 70 SR и 10 Analytic	Детальный анализ льда B, G, R, NIR, сетка 3 м
Съёмка МКС	23 фотографии	Независимый визуальный материал



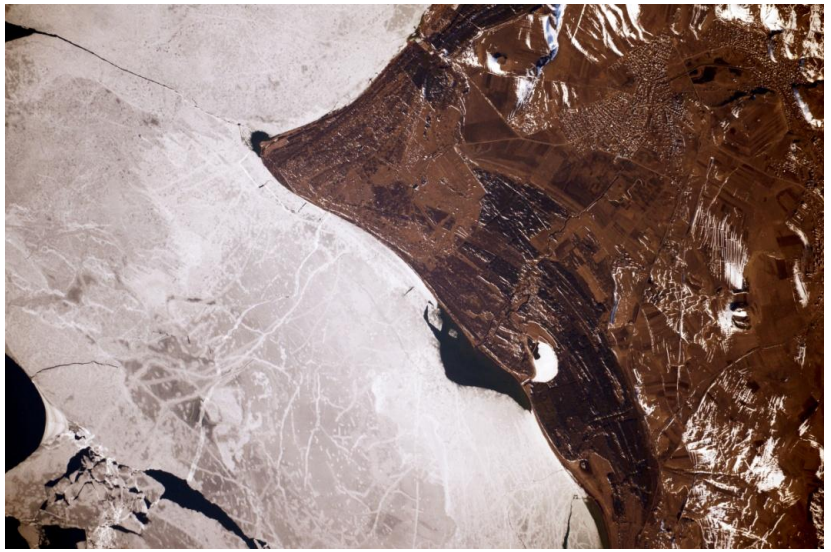
зеленое - SR, голубое - TOA

PlanetScope

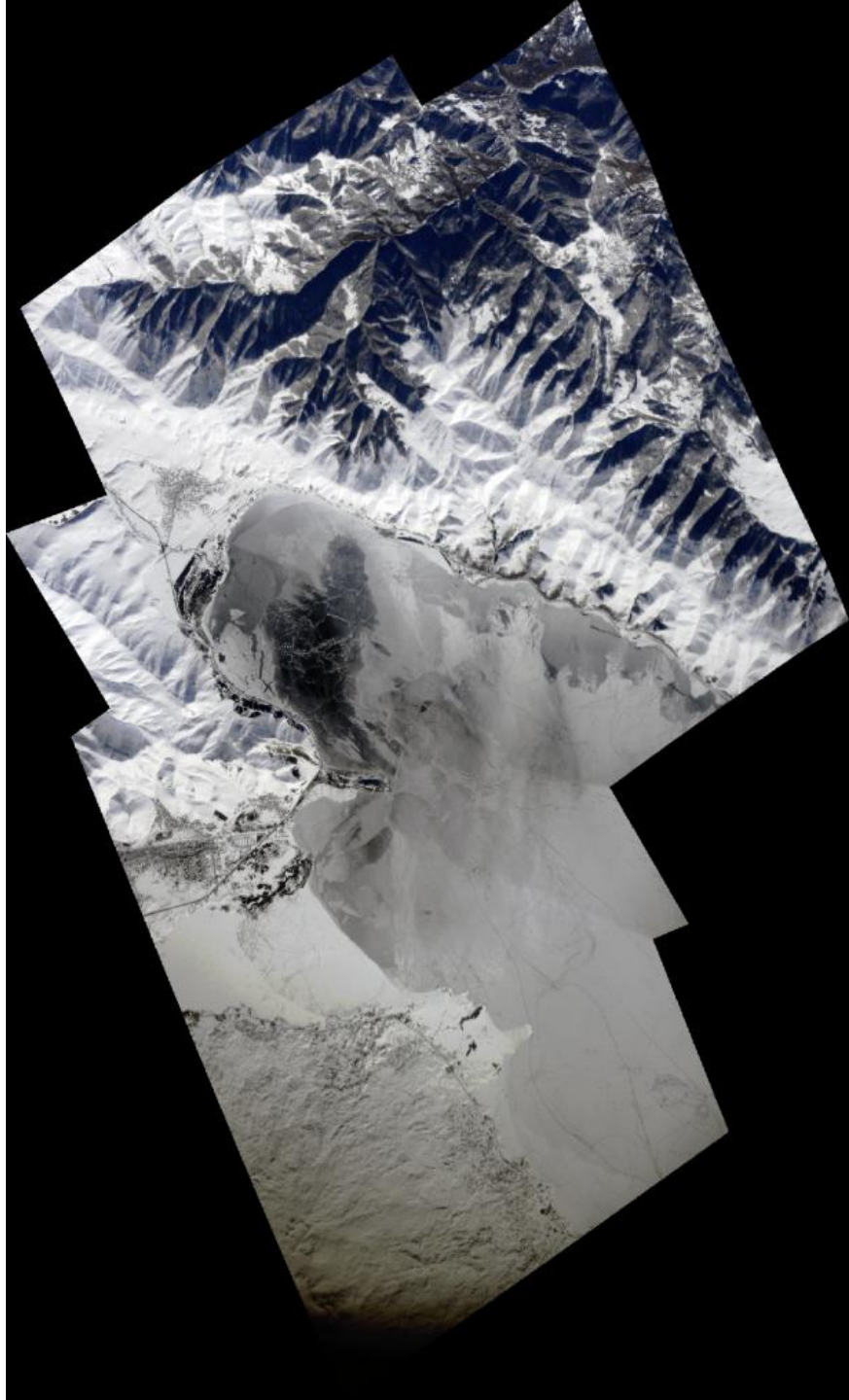
- 25.02-09.04.2017 интервал
- 16 спутников

Снимки с МКС

- пространственная привязка
- сформированы группы нормализованных мозаик



Пространственная привязка снимков с МКС



Институт географии, Российская Академия Наук

Изображения PlanetScope

ID спутника	Сенсор	Семейство	Орбита XML	Всего сцен	SR	Analytic	Даты UTC
0c24	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-ISS	5	0	5	2017-03-02
0c82	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-ISS	2	0	2	2017-04-03
0e14	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	7	7	0	2017-03-15
0e19	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	6	6	0	2017-03-25; 2017-03-30
0e20	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	7	4	3	2017-03-29; 2017-04-03
0e26	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	5	5	0	2017-03-08
0e2f	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	7	7	0	2017-03-23
0e30	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	6	6	0	2017-04-09
0e3a	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	3	3	0	2017-02-25
0f1d	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	5	5	0	2017-03-26
0f25	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	4	4	0	2017-03-26
100f	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	5	5	0	2017-03-25
1017	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	1	1	0	2017-04-09
1019	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	6	6	0	2017-03-30
1034	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	6	6	0	2017-04-04
1038	PS2	PlanetScope Dove Classic	LEO-SSO	5	5	0	2017-04-04

LEO-ISS - низкая околоземная орбита международной космической станции
LEO-SSO - солнечно-синхронная орбита, находящаяся в пределах низкой околоземной орбиты

Дата UTC	SR	Analytic	ID спутников	Облака JSON, среднее %	Снег/лёд, среднее %	Аномальные, среднее %
2017-02-25	3	0	0e3a	4,3%	87,3%	69,3%
2017-03-02	0	5	0c24	16,4%	49,2%	67,6%
2017-03-08	5	0	0e26	14,6%	77,2%	78,8%
2017-03-15	7	0	0e14	5,3%	47,0%	45,9%
2017-03-23	7	0	0e2f	18,6%	73,7%	85,0%
2017-03-25	8	0	0e19; 100f	31,0%	56,3%	84,3%
2017-03-26	9	0	0f1d; 0f25	28,9%	42,4%	73,9%
2017-03-29	4	0	0e20	10,0%	69,8%	68,0%
2017-03-30	9	0	0e19; 1019	0,8%	53,0%	49,1%
2017-04-03	0	5	0c82; 0e20	8,6%	12,8%	29,6%
2017-04-04	11	0	1034; 1038	33,3%	23,5%	67,9%
2017-04-09	7	0	0e30; 1017	25,0%	10,0%	33,0%

Статистика по артефактам PS

Институт географии, Российская Академия Наук
Каталог изображений с МКС

- 356 уникальных снимков
- 39 дубликатов
- 10 дат съемки
- 2 разные камеры

период съемки:
18.02.2017 – 03.07.2018

параметры камер

Модель камеры	Кадров	Размер, Мп	Доля
NIKON D4	35	16,16	9,8%
NIKON D5	321	20,67	90,2%

Дата съёмки	Уникальных кадров	Камера	Размер, px	Фокусное, мм	f/	ISO	Выдержка, с	Интервал, с
2017-02-18	23	Nikon D4	4928 × 3280	1200	8	400	1/3200–1/1250	47,00
2017-04-05	12	Nikon D4	4928 × 3280	1200	8	320–400	1/1250	39,30
2017-07-01	26	Nikon D5	5568 × 3712	1000	10	400	1/2000–1/800	17,73
2017-12-12	21	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	2000–7200	1/6400	19,80
2017-12-13	18	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	2800–8000	1/6400	14,94
2017-12-27	67	Nikon D5	5568 × 3712	1200–1600	8–14	1100–20000	1/6400–1/4000	132,08
2018-04-17	49	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	500–1600	1/2000	32,04
2018-05-04	56	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	640–1800	1/2000	35,13
2018-07-02	45	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	900–1400	1/1600	34,67
2018-07-03	39	Nikon D5	5568 × 3712	1600	11	1250–1600	1/1600	21,68
Итого	**356**							

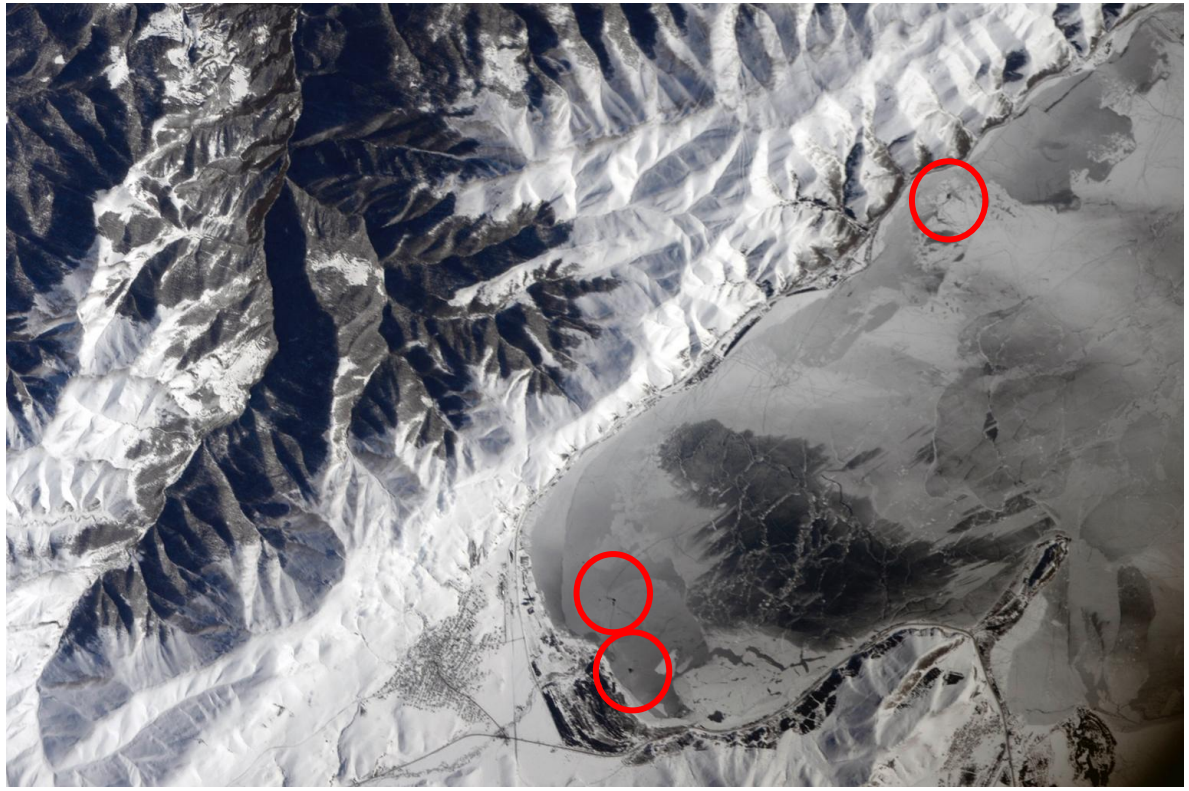
Интервал - время, прошедшее между первый и последним кадрами
f/ – диафрагма объектива – чем меньше число, тем шире открыта диафрагма и тем больше света попадает на матрицу

Институт географии, Российская Академия Наук

Каталог изображений с МКС



Снимок с МКС, 02.07.2017



Снимок с МКС, 18.02.2018

Институт географии, Российская Академия Наук

Тематические данные

- Геологическая карта
- Климатическая карта
- ЦММ
- Схема областей питания грунтовых вод
- Районирование бассейна оз. Севан
- Схема основных зон разгрузки подземных вод

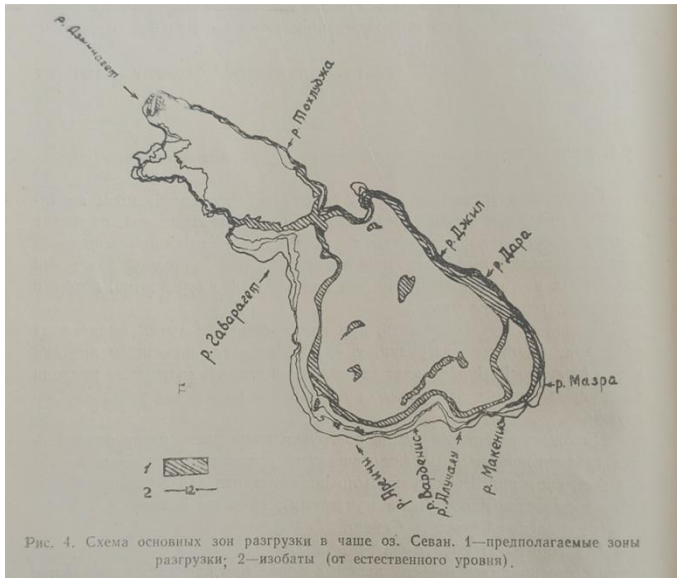


Рис. 4. Схема основных зон разгрузки в чаше оз. Севан. 1—предполагаемые зоны разгрузки; 2—изобаты (от естественного уровня).

схема основных зон разгрузки
в чаше оз. Севан

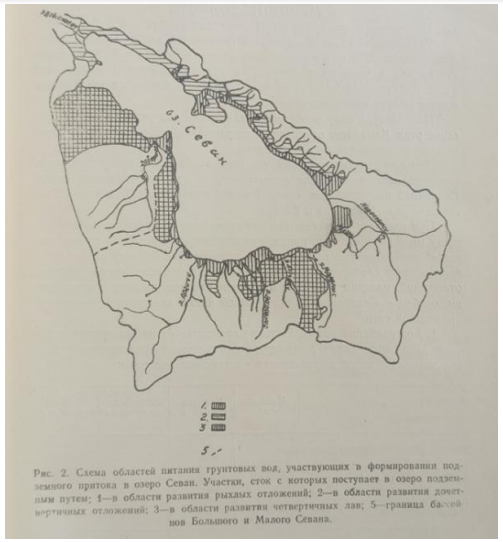


Рис. 2. Схема областей питания грунтовых вод, участвующих в формировании подземного притока в озеро Севан. Участки, сток с которых поступает в озеро подземным путем: 1—в области развития рыхлых отложений; 2—в области развития дочетвертичных отложений; 3—в области развития четвертичных лав; 5—граница бассейнов Большого и Малого Севана.

схема областей питания грунтовых вод

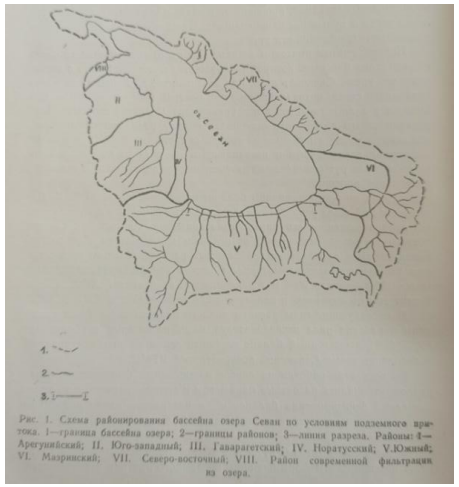
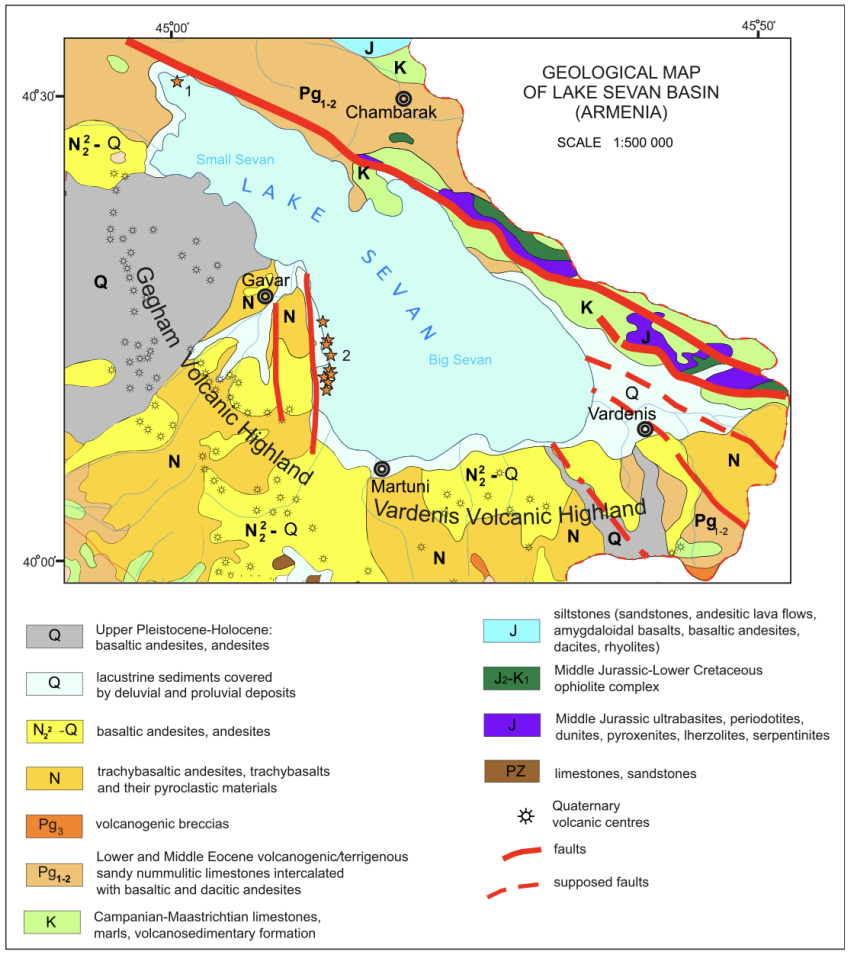


Рис. 1. Схема районирования бассейна озера Севан по условиям подземного притока. 1—граница бассейна озера; 2—границы районов; 3—линия разреза. Районы: I—Арегунийский; II. Юго-западный; III. Гавараетский; IV. Норатусский; V.Южный; VI. Мазринский; VII. Северо-восточный; VIII. Район современной фильтрации из озера.

схема районирования бассейна озера Севан

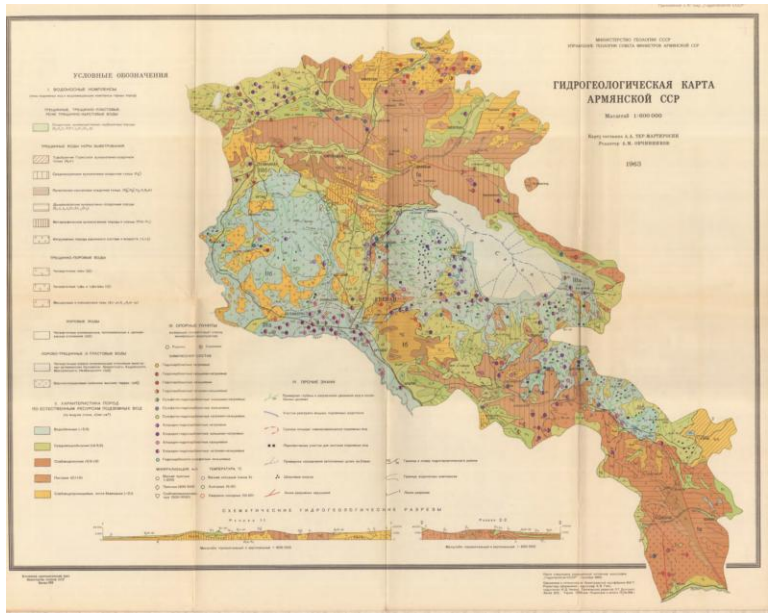


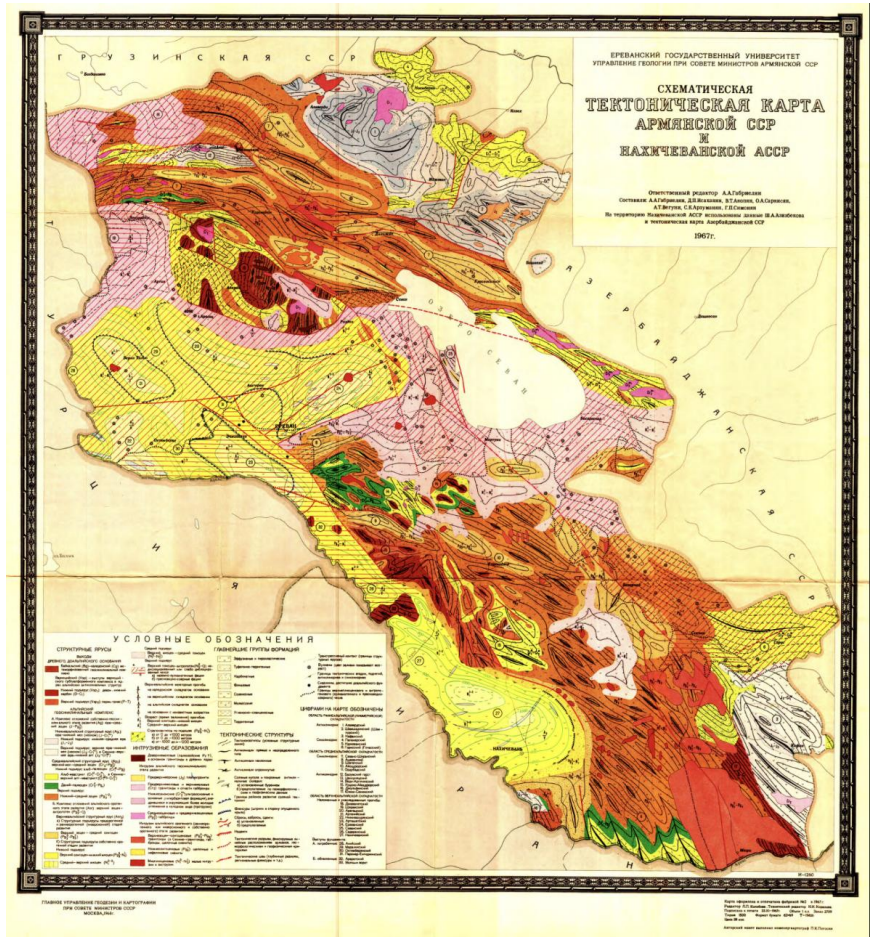
Геологическая карта бассейна оз. Севан

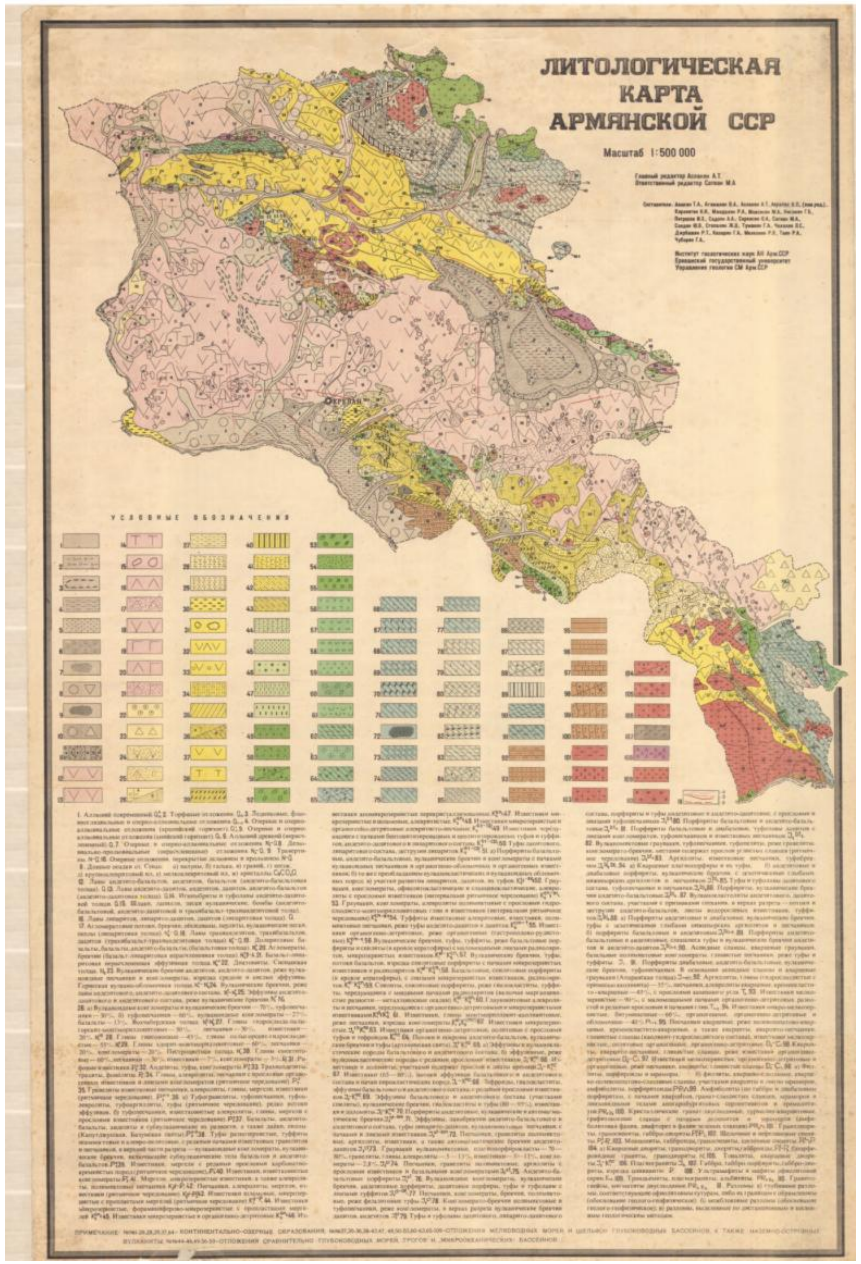
Институт географии, Российская Академия Наук

Тематические карты

- Геологическая
- Тектоническая
- Литологическая
- Гидрогеологическая
- Геоморфологическая
- Сейсмической опасности
- Магматических и метаморфических формаций

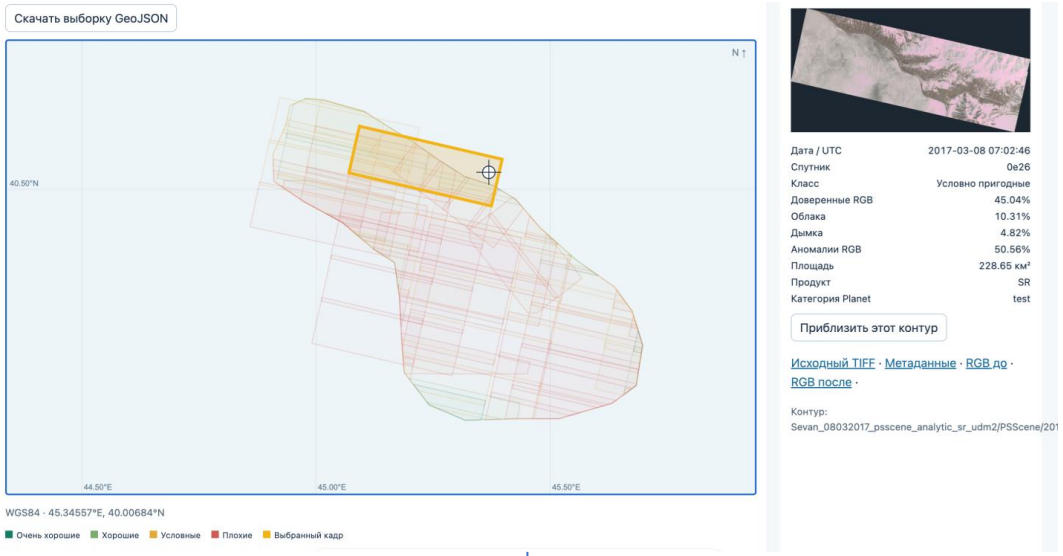






Институт географии, Российская Академия Наук

Анализ исходных данных



платформа управления спутниковыми изображениями



метаданные спутниковых изображений

Найти сцену или спут | Все даты | Все классы | SR и TOA

Показано 80 из 80 сцен. Нажмите заголовок для сортировки.

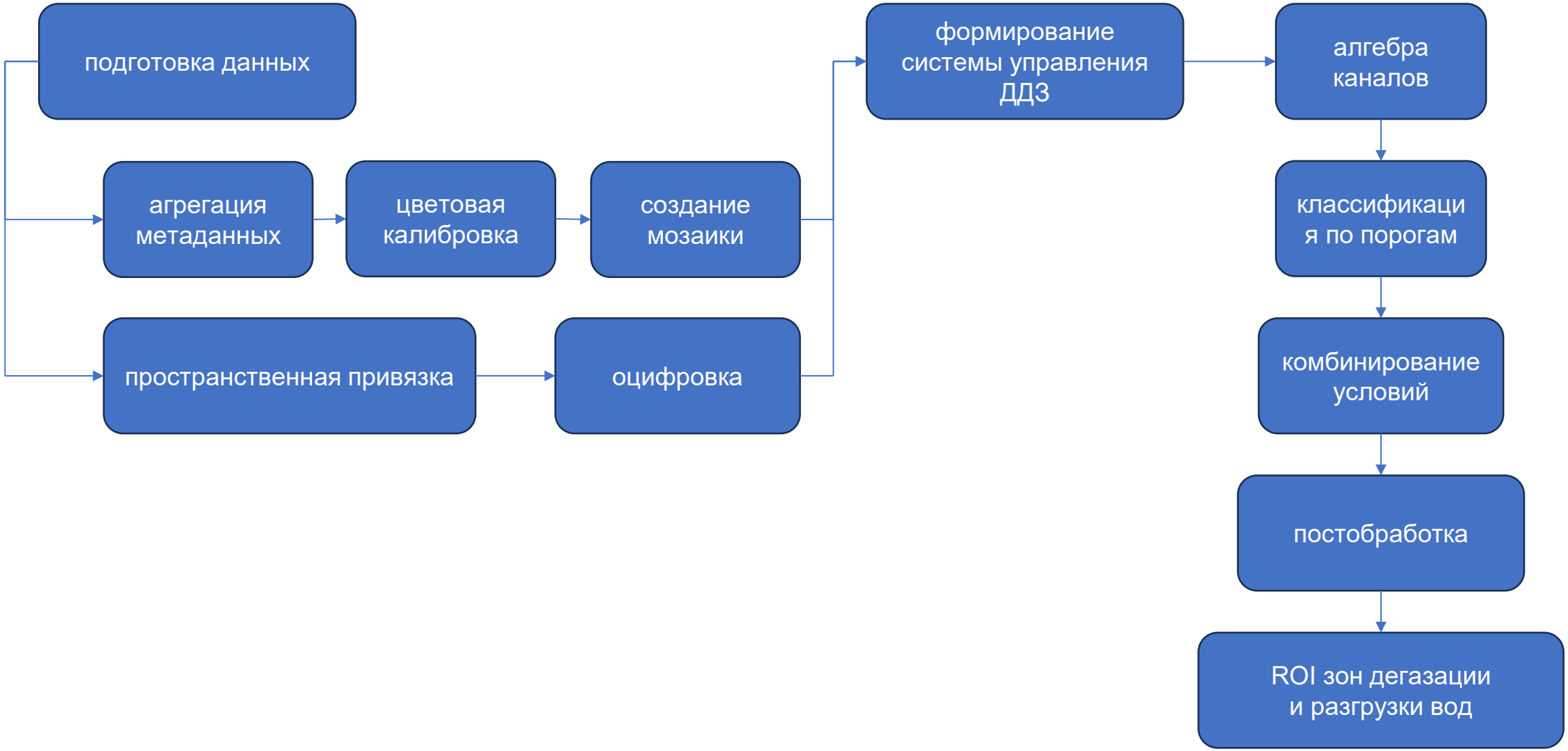
Ранг	Сцена	Класс	Баллы, %	Площадь, км²	Облака, %	Дымка, %	Аномалии RGB, %	JSON аномалии, %	Продукт / просмотр
1	20170330_070055_0e19	Очень хорошие	99.86	3.68	0.00	0.00	0.14	44.00	SR · до
2	20170404_065645_1038	Очень хорошие	96.82	42.19	0.00	0.00	3.18	55.00	SR · до
3	20170404_065627_1034	Хорошие	94.29	51.78	0.00	0.00	5.71	40.00	SR · до / после
4	20170326_065436_0f1d	Хорошие	92.55	7.82	0.09	1.51	5.95	72.00	SR · до
5	20170330_065726_1019	Хорошие	89.29	26.80	0.00	0.00	10.71	63.00	SR · до / после
6	20170315_070257_0e14	Хорошие	88.01	13.51	0.00	0.00	11.99	60.00	SR · до / после
7	20170315_070251_0e14	Хорошие	87.04	36.15	0.00	0.01	12.96	48.00	SR · до / после
9	20170330_065723_1019	Хорошие	82.68	168.04	0.00	0.10	17.22	23.00	SR · до / после
10	20170330_065724_1019	Хорошие	81.74	215.02	1.62	1.34	16.85	17.00	SR · до / после
11	20170404_065620_1034	Хорошие	79.07	21.55	0.00	0.00	20.93	58.00	SR · до / после
12	20170330_070056_0e19	Хорошие	77.12	12.52	0.93	0.00	22.88	52.00	SR · до / после
13	20170325_065449_100f	Хорошие	75.61	26.92	0.97	0.80	23.67	72.00	SR · до / после
8	20170409_070214_0e30	Условно пригодные	83.14	107.44	3.34	11.82	2.12	28.00	SR · до / после
14	20170403_070146_0e20	Условно пригодные	70.20	44.91	10.91	13.79	11.80	27.00	TOA_from_Analytic · до / после
15	20170329_070506_0e20	Условно пригодные	66.66	92.45	11.68	1.98	31.72	52.00	SR · до / после
16	20170409_070215_0e30	Условно пригодные	63.74	190.42	17.34	17.66	2.12	4.00	SR · до / после
19	20170403_070147_0e20	Условно пригодные	62.97	57.43	1.81	15.66	22.40	37.00	TOA_from_Analytic · до / после

- Метрика расчета качества спутниковых изображений связана с поставляемыми PS масками классов
- Пороги классификации – ручные и могут меняться в любую сторону

Баллы – точная доля пикселей Clear/Snow без облаков, дымки, теней и аномалий RGB в поставленном файле. Снег считается допустимым.

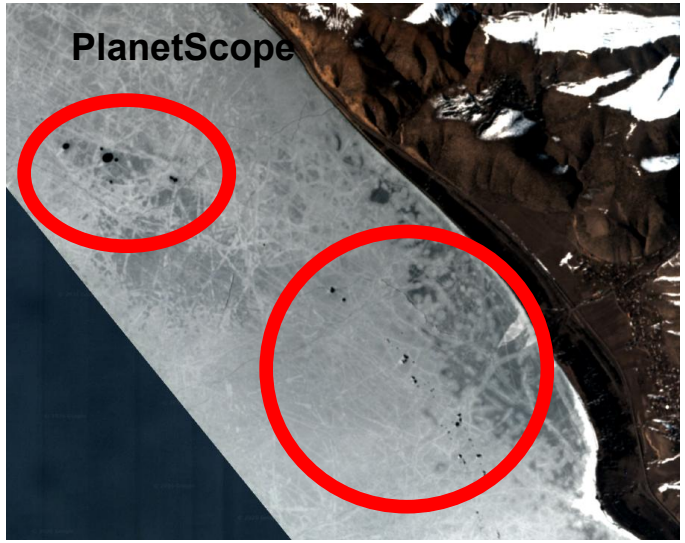
Институт географии, Российская Академия Наук

Этапы обработки

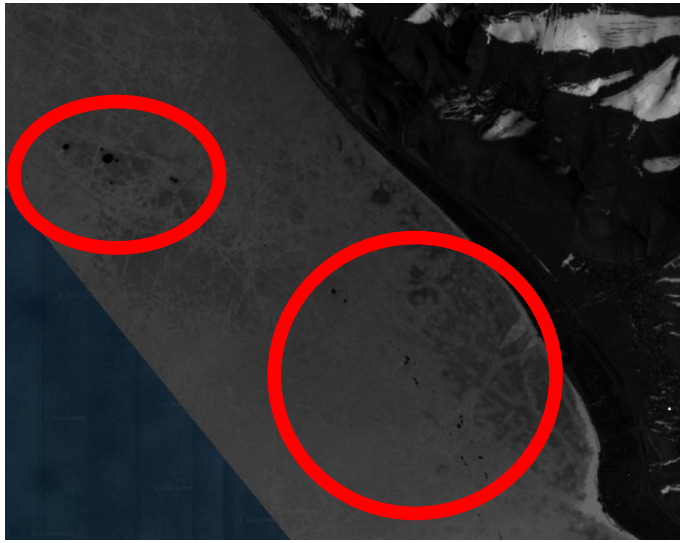


Институт географии, Российская Академия Наук

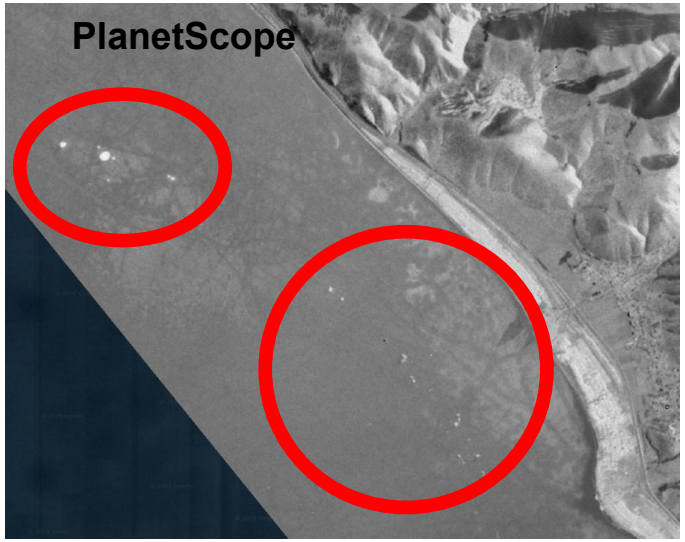
Дешифровочные признаки пропарин



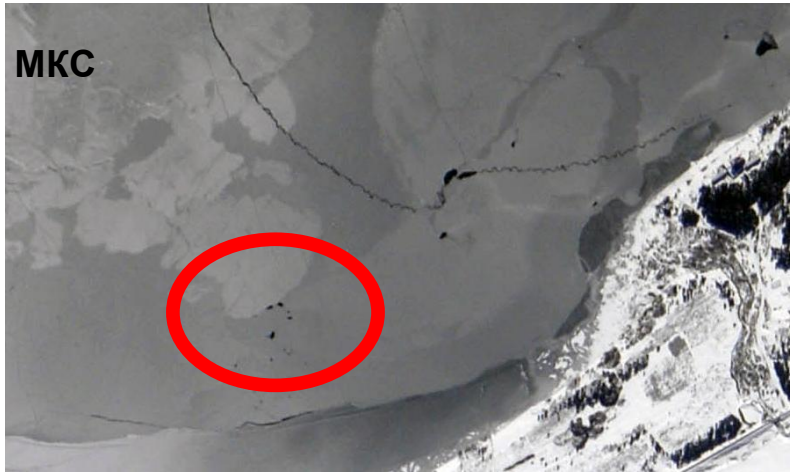
изображение в синтезе естественных цветов



ближний инфракрасный канал



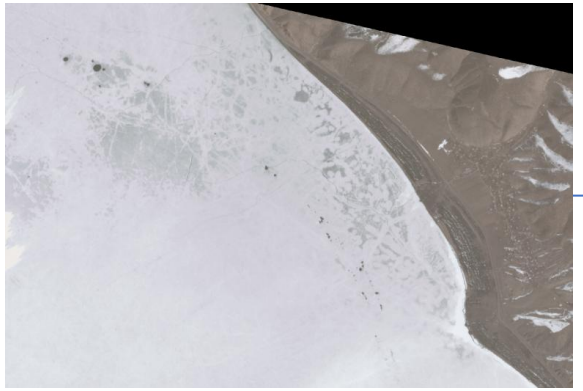
NDWI



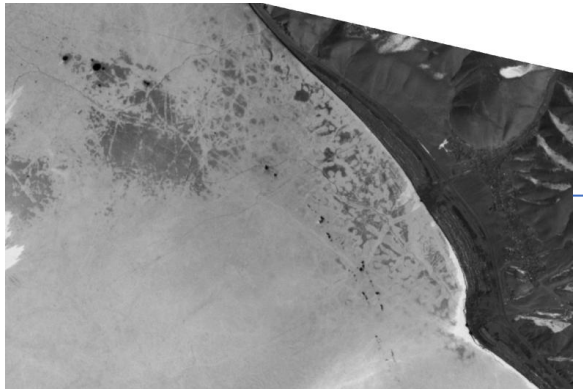


Институт географии, Российская Академия Наук

Методика распознавания пропарин



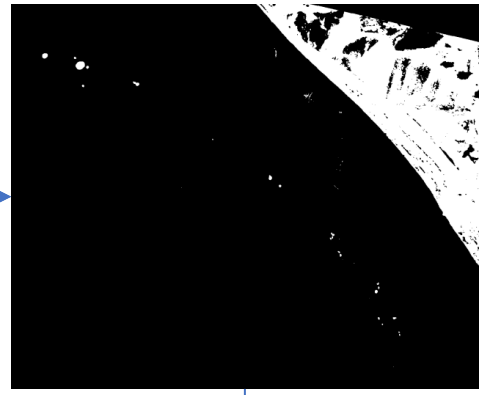
изображение в синтезе естественных цветов



NIR или нормализованный разностный индекс

алгебра каналов

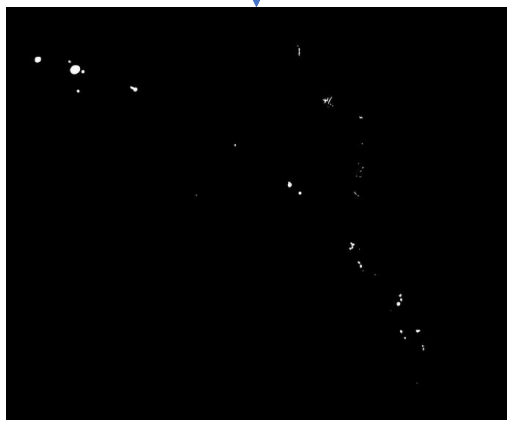
кандидаты участков открытой воды



бинарная маска водоема



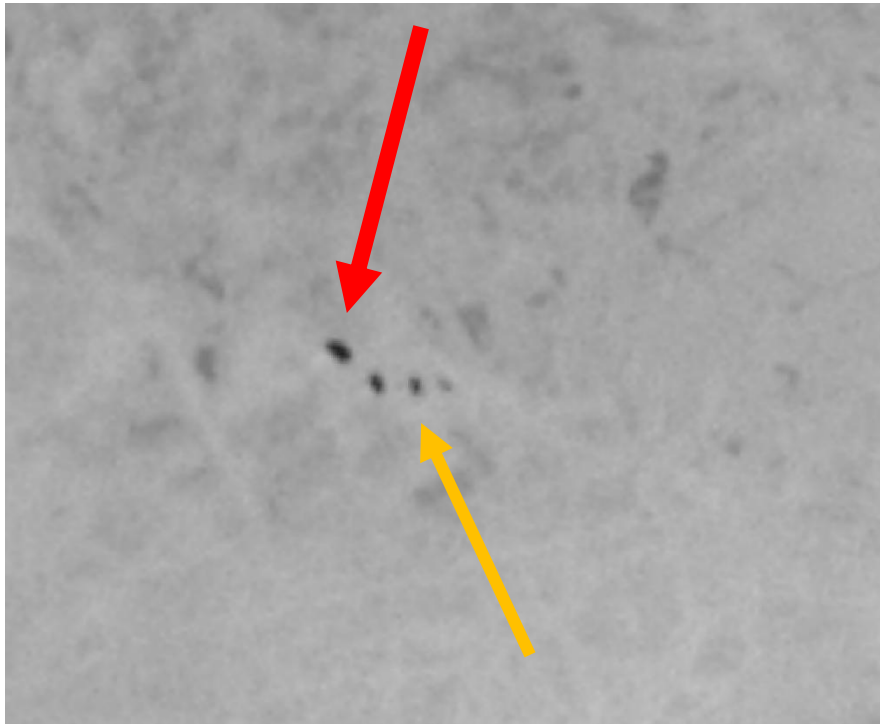
объединение условий



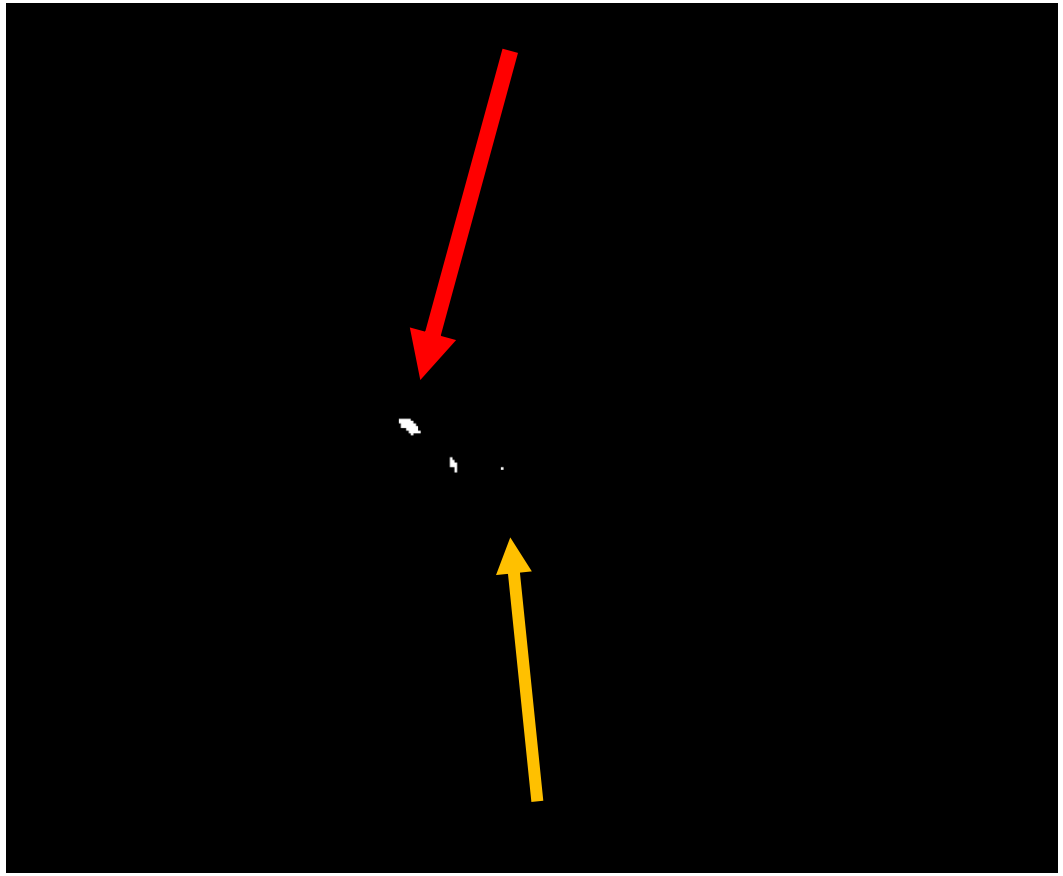
участки открытой воды

Институт географии, Российская Академия Наук

Распознавание небольших пропарин



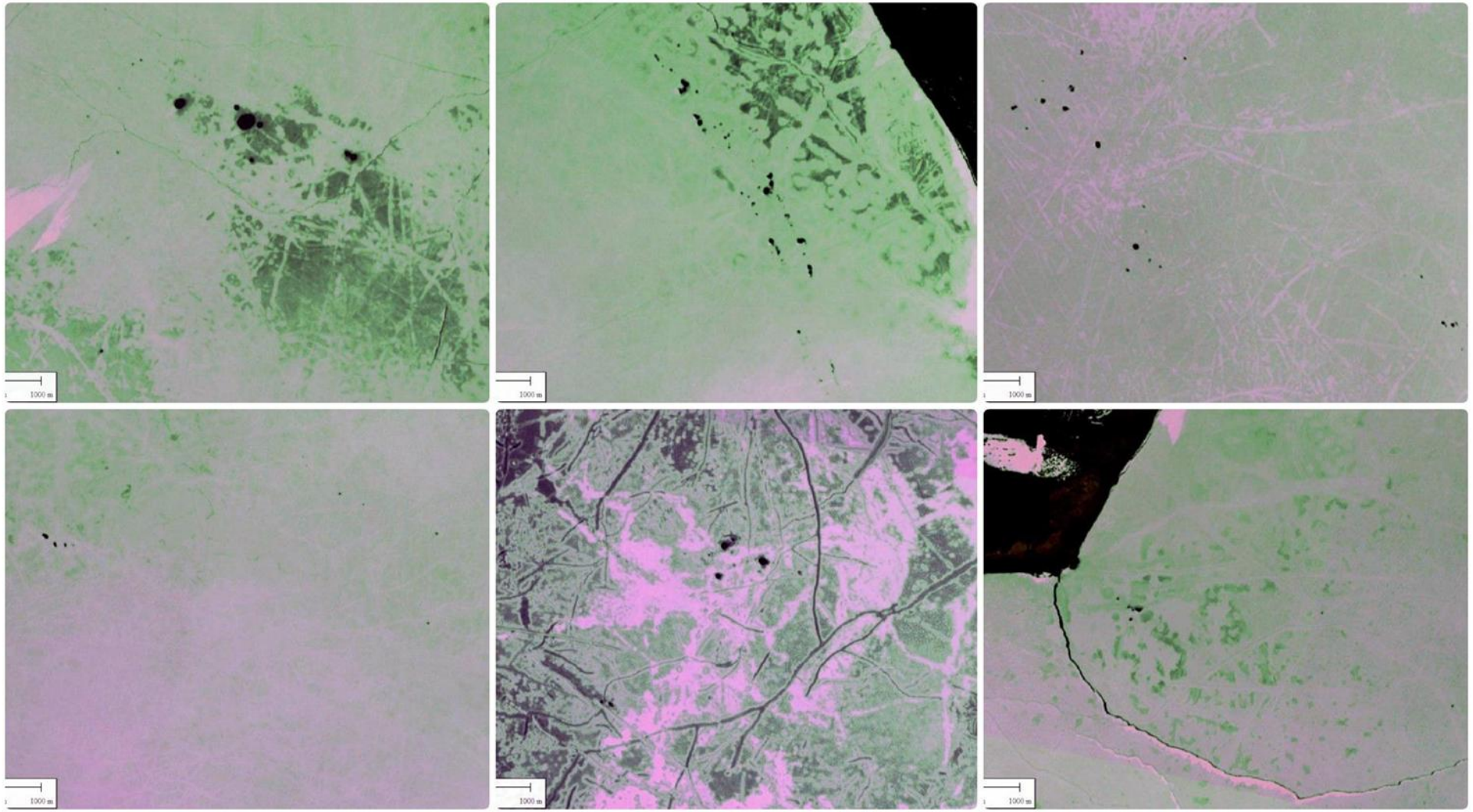
отображение пропарин в NIR диапазоне



бинарная маска ROI

Институт географии, Российская Академия Наук

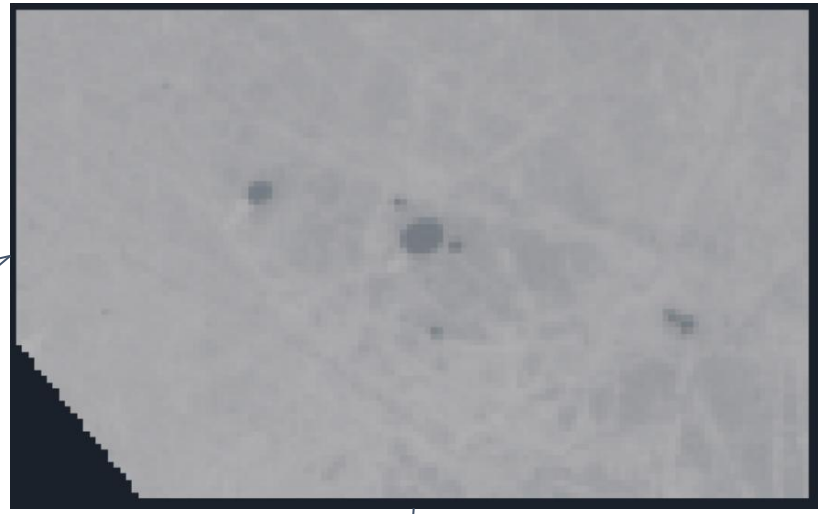
Группы пропарин

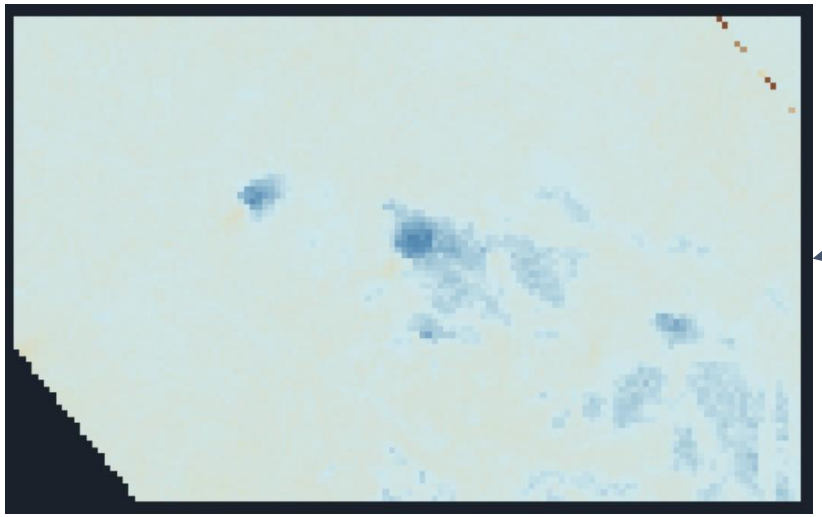


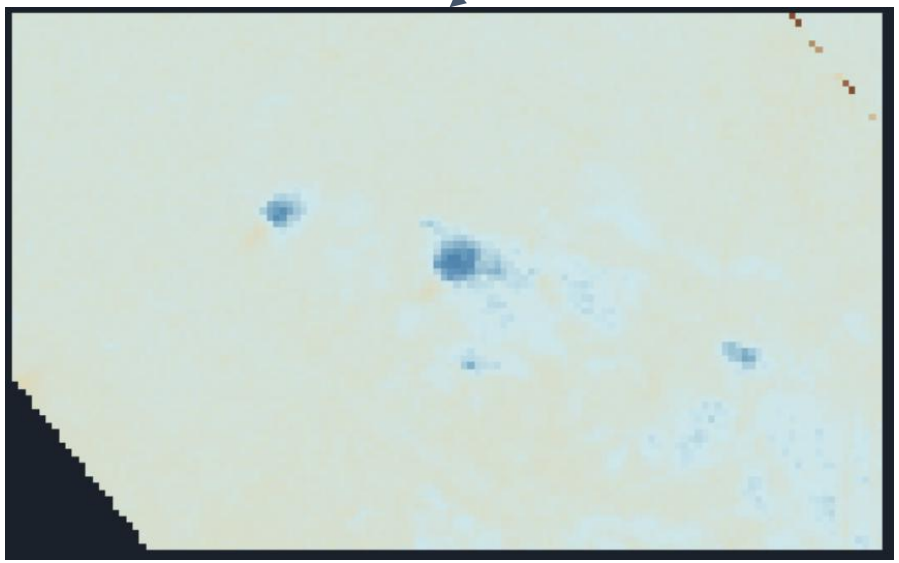
Институт географии, Российская Академия Наук

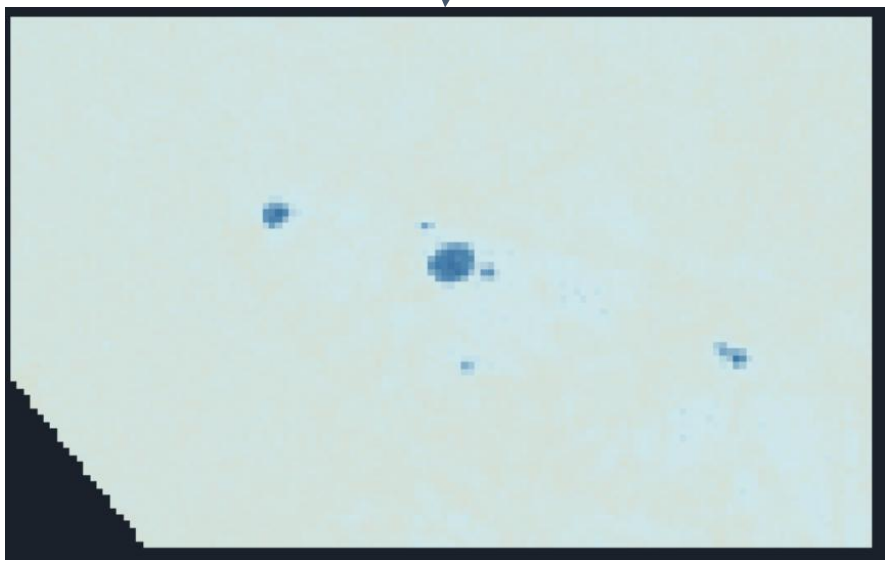
Открытая вода и мокрый снег

Изображение в синтезе естественных цветов





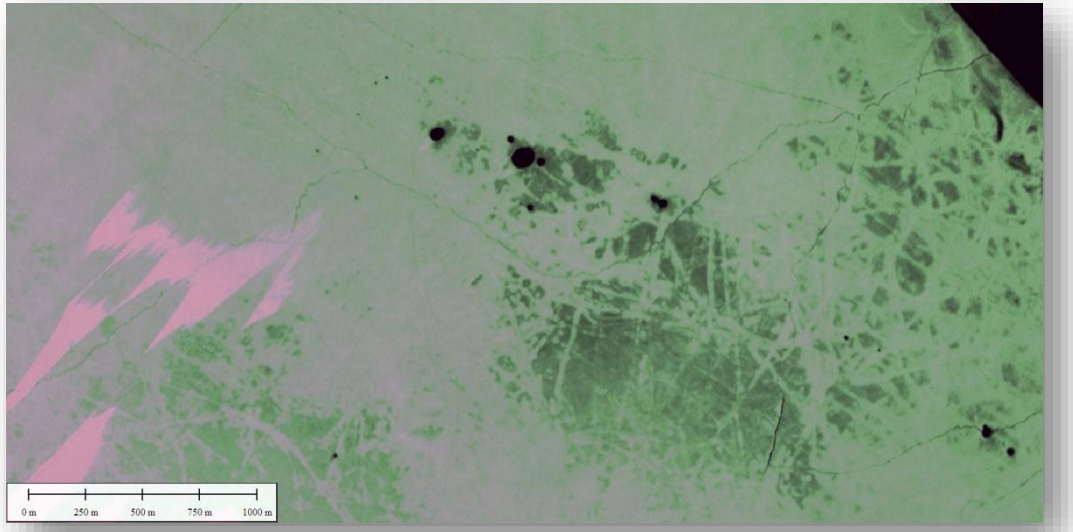


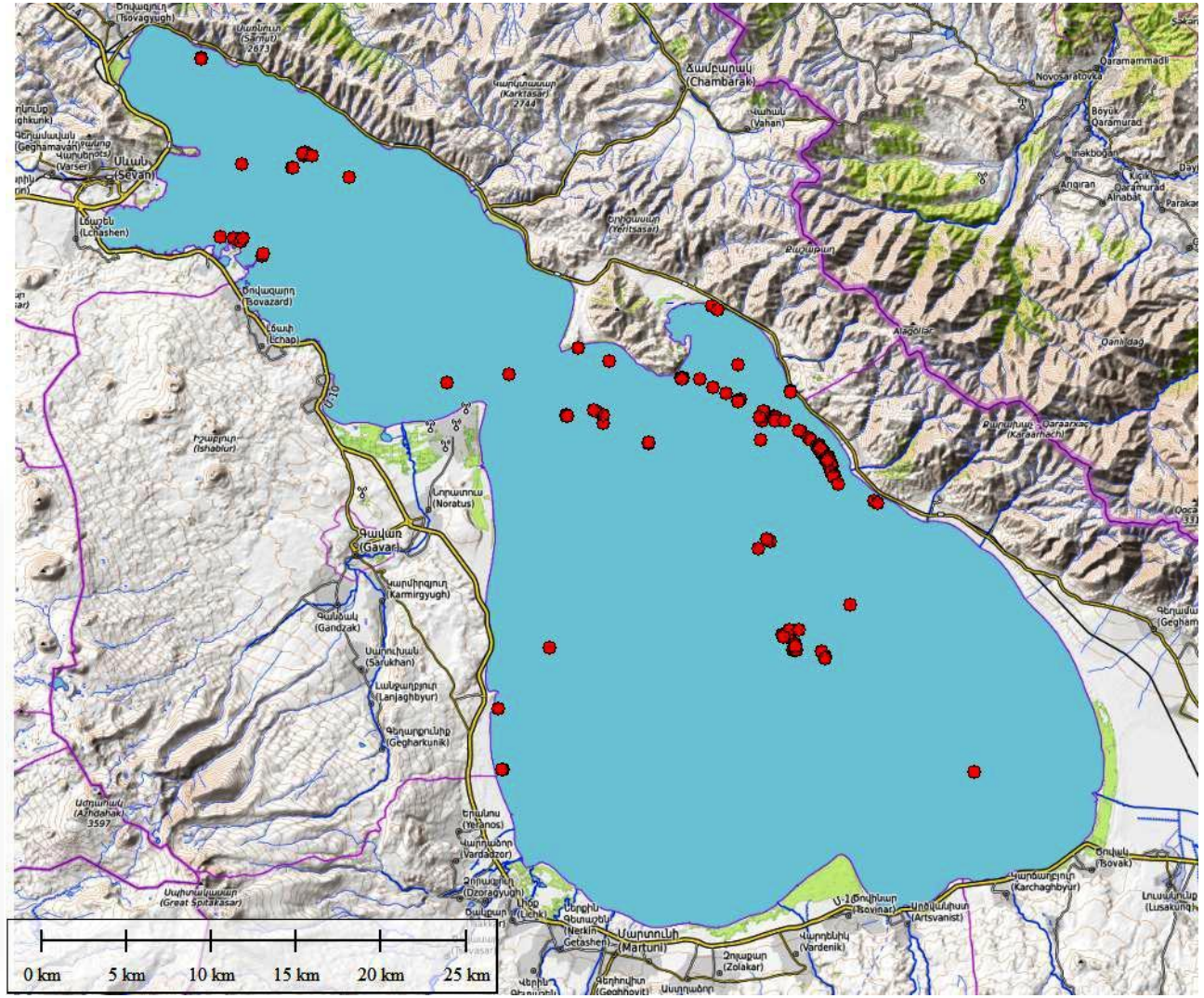


Институт географии, Российская Академия Наук

Результаты

- По материалам данных ДЗЗ выявлено **129 пропарин** (нарушения ледового покрова), которые являются потенциальными местами дегазации и выхода подземных вод

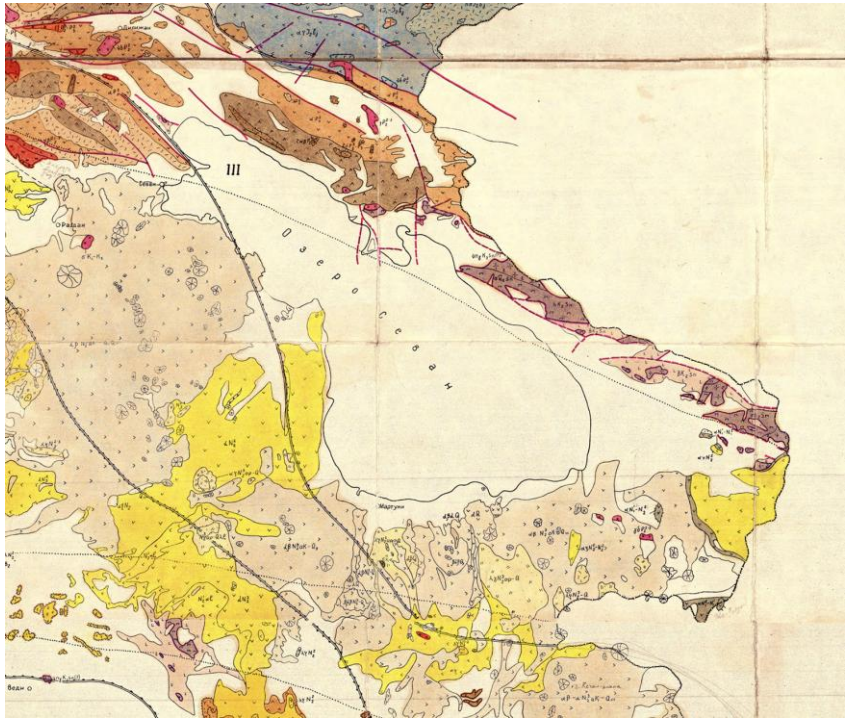




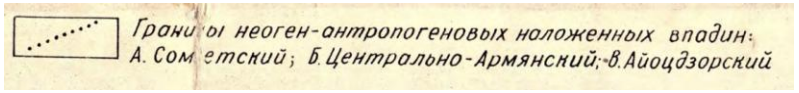
Институт географии, Российская Академия Наук

Результаты

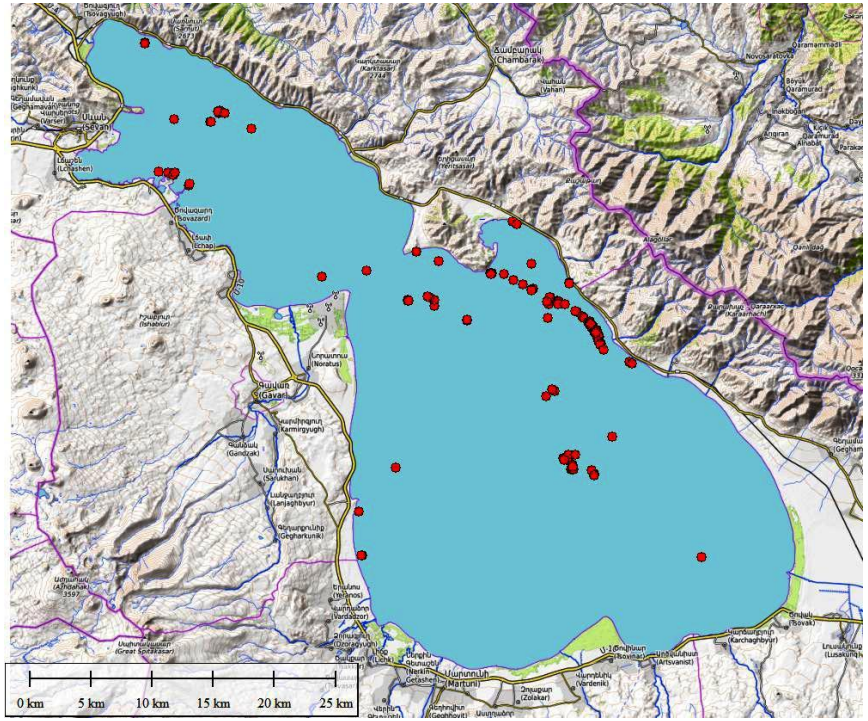
Карта магматических и метаморфических формаций оз. Севан



Условные обозначения:



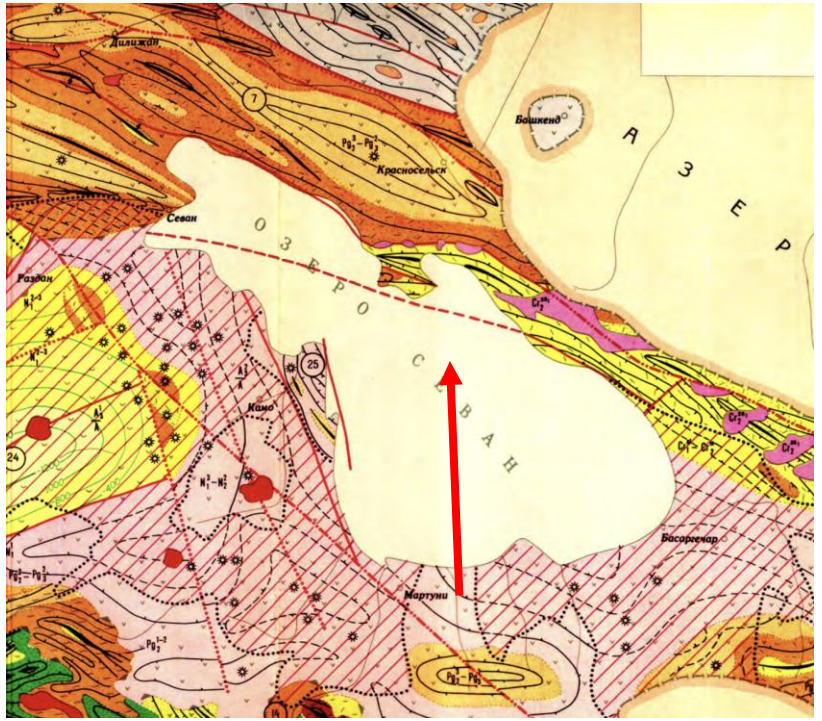
Точки пропарин на оз. Севан



Условные обозначения:

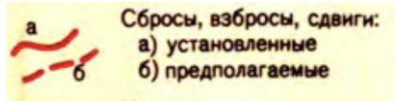
- Пропарина

Тектоническая карта оз. Севан, 1967 г.



Условные обозначения:

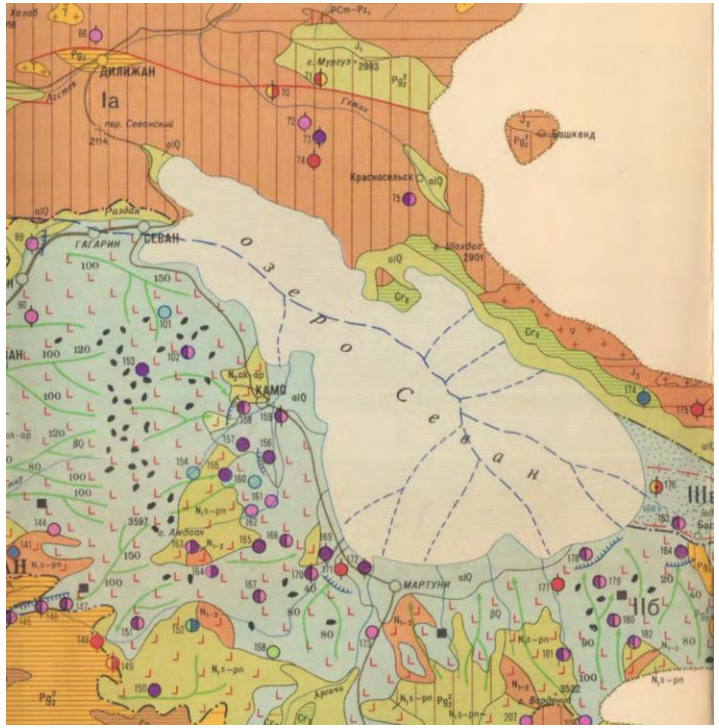
Тектонические нарушения в земной коре



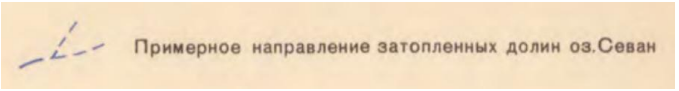
Институт географии, Российская Академия Наук

Результаты

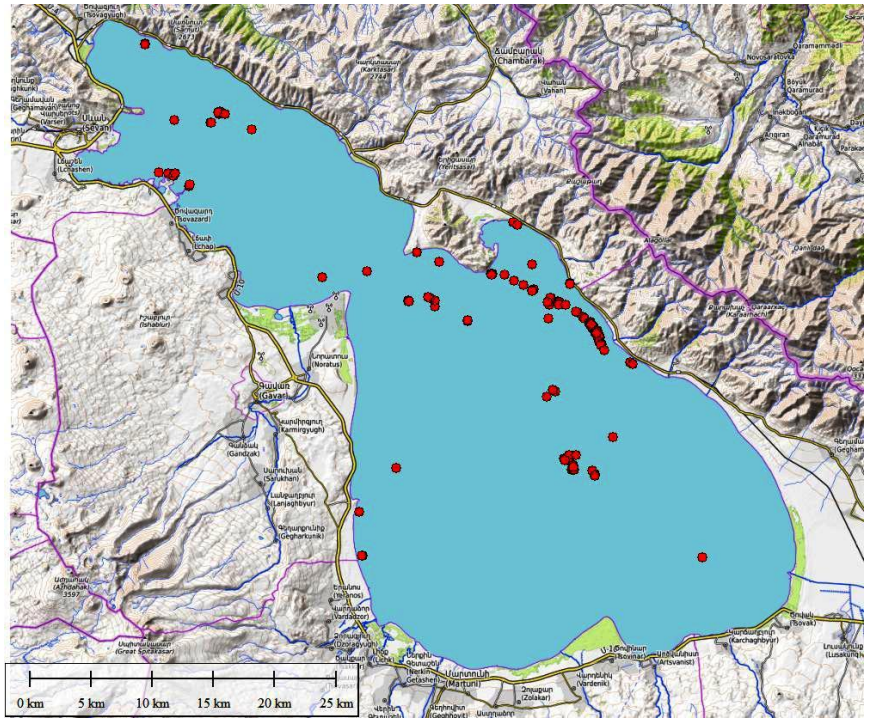
Гидрогеологическая карта оз. Севан, 1963 г.



Условные обозначения:



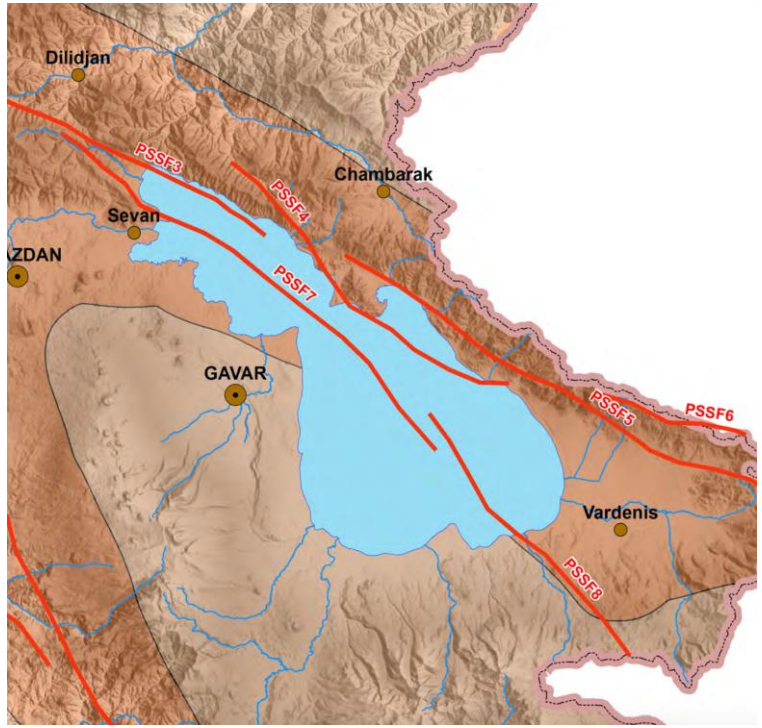
Точки пропарин на оз. Севан



Условные обозначения:

Пропарина

Карта сейсмической опасности оз. Севан, 2017 г.



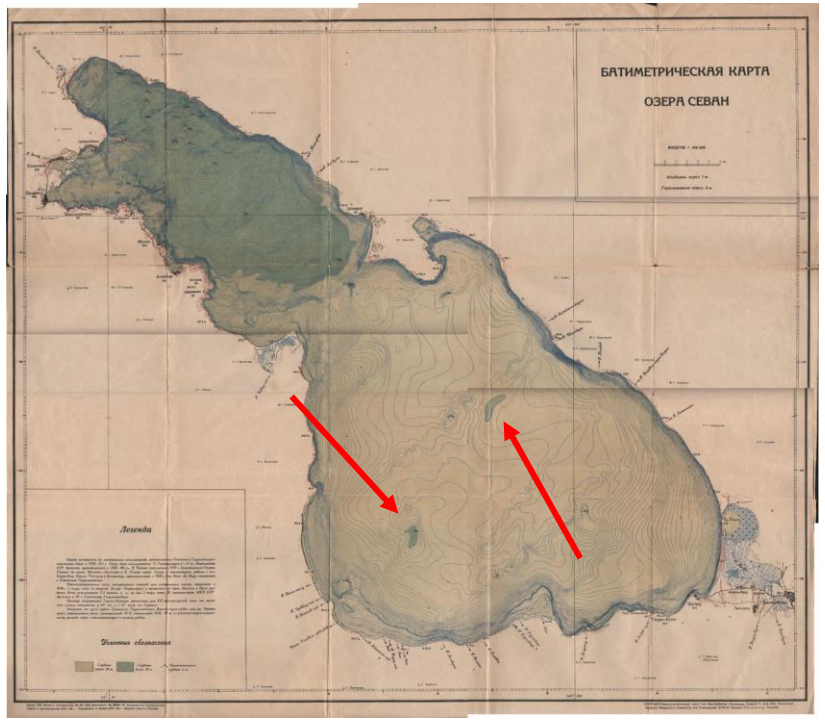
Условные обозначения:

Сейсмогенные разломы

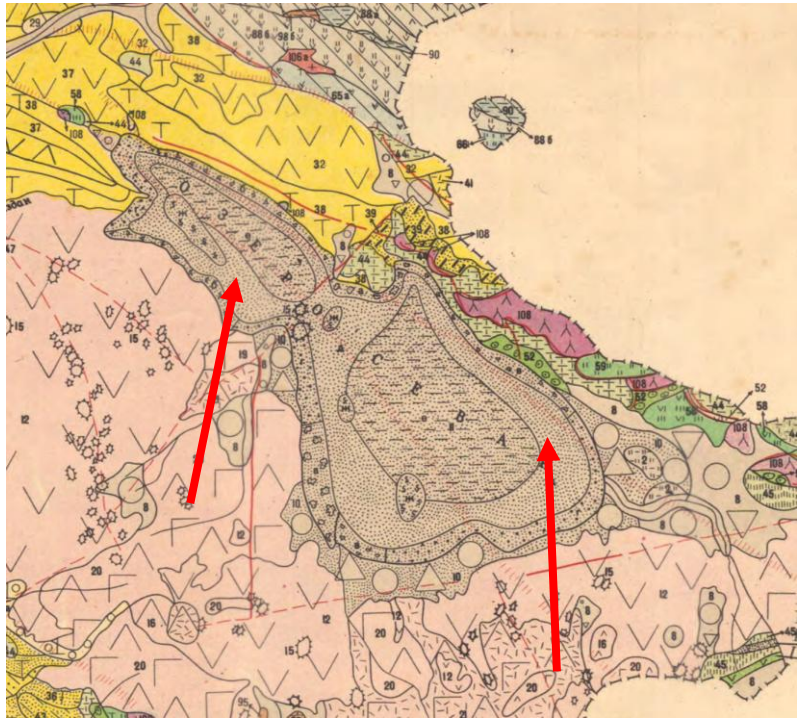
Институт географии, Российская Академия Наук

Результаты

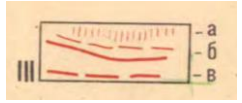
Цифровая батиметрическая карта оз. Севан



Литологическая карта оз. Севан

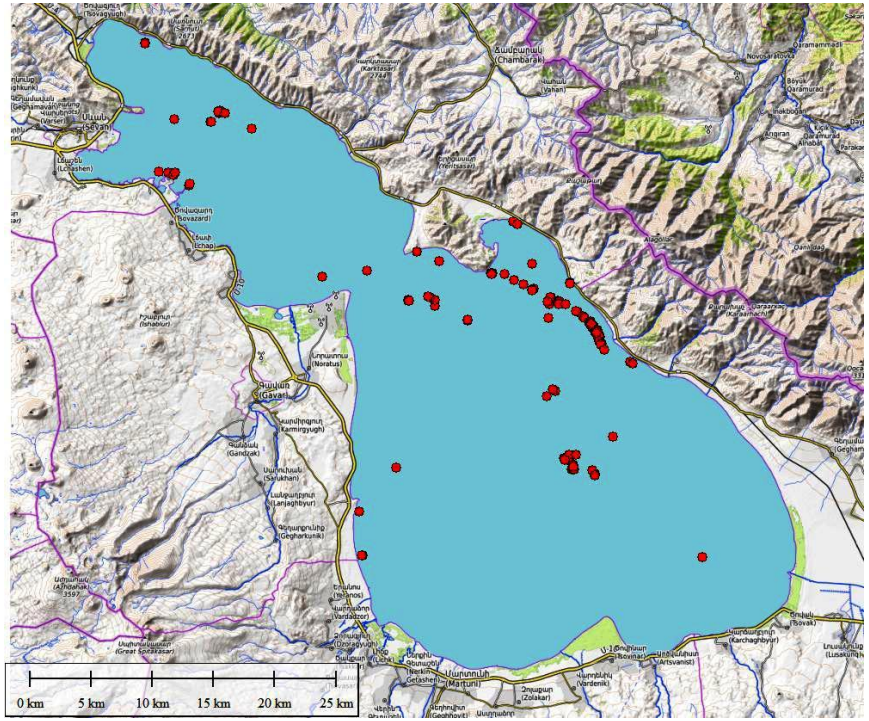


Условные обозначения:



Разломы
а) Глубинные
б) Межблоковые
в) Выделенные по косвенным признакам

Точки пропарин на оз. Севан



Условные обозначения:

Пропарина

Выводы

-Снижение уровня Севана на 18,8 м изменило тепловой режим озера: сокращение фазы прогрева (апрель – конец июля вместо мая – августа); снижение теплоёмкости на ~29 % (700 → 500 × 10^{12} ккал).

-Частота полного замерзания выросла многократно: с 1 раза в 15–20 лет до 1 раза в 1–5 лет.

-Мультиспектральные спутниковые изображения показали особую эффективность в задаче сегментации участков нарушения целостности ледового покрова

-Разработанная методика продемонстрировала способность выделять как крупные зоны открытой воды, так и небольшие пропарины

-В ходе исследования выделено 129 пропарин, которые имеют групповой и одиночный характер проявлений. Две из них совпадают с результатами подводных исследований других авторов.

-По космическим изображениям невозможно достоверно классифицировать причины нарушений целостности ледового покрова, но пространственное распределение (линейность) пропарин говорит о геологических факторах их происхождения

-Тематический картографический материал позволяет больше узнать о генезисе пропарин

ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
Российской академии наук

основан в 1918 году

Возможности дистанционного зондирования для выявления и картографирования пропарин в ледовом покрове озера Севан

Медведев А.А.*, Овсепян А.А., Асмарян Ш.Г.**, Айвазян Г.М.*, Мельников М.Г.***

*Отдел картографии и дистанционного зондирования Земли

**Центр эколого-ноосферных исследований НАН РАН