

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 3, 2022

---

---

## Использование космической информации о Земле

Когерентность колебаний компонентов глобальной климатической системы с медленными флуктуациями солнечной активности по данным наземных и спутниковых наблюдений <i>О. М. Покровский, И. О. Покровский</i>	3
Новые данные о строении подводных возвышенностей Богорова, Тояма и прилегающих участков дна Японского моря (по результатам геоморфологических и космогеологических исследований) <i>А. А. Гаврилов</i>	17
Динамика энергии тропических циклонов в зависимости от их взаимного расположения <i>М. И. Ярошевич</i>	30
Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники <i>С. К. Клименко, А. Ю. Иванов, Н. В. Терлеева</i>	37
Аномальное литосферное магнитное поле над территорией индо-азиатской коллизии по данным спутника CHAMP <i>Д. Ю. Абрамова, Л. М. Абрамова, И. М. Варенцов</i>	55
Некоторые возможности линеаментного анализа при картировании разноранговых разломов (на примере Прибайкалья) <i>Г. Н. Иванченко, Э. М. Горбунова, А. В. Черемных</i>	66
Взаимосвязь между температурой и типом подстилающей поверхности на примере города Ханой, Вьетнам <i>Ле Хунг Чинь, В. Р. Заблоцкий, И. В. Зеньков, Зань Туен Ву, Кхань Хоай Дао</i>	84

---

---

# Contents

---

---

No. 3, 2022

---

---

## Utilization of the Earth Space Data

Coherence of Fluctuations of Components of the Global Climate System with Slow Fluctuations of Solar Activity According to Conventional and Satellite Observations <i>O. M. Pokrovsky, I. O. Pokrovsky</i>	3
New Data on the Structure of Bogorov, Toyama Underwater Rises and Adjacent Areas of the Sea of Japan Bottom (Based on the Results of Geomorphological and Cosmogeological Investigations) <i>A. A. Gavrilov</i>	17
Energy Dynamics of Tropical Cyclones Depending on Their Relative Location <i>M. I. Yaroshevich</i>	30
Oil Pollution of the Kerch Strait Based on Five-Year Monitoring with SAR: Current Status and Main Sources <i>S. K. Klimenko, A. Yu. Ivanov, N. V. Terleeva</i>	37
Lithospheric Magnetic Anomalies over the India-Asia Collision on Measurements of the CHAMP Satellite <i>D. Yu. Abramova, L. M. Abramova, I. M. Varentsov</i>	55
Some Possibilities of Lineament Analysis for Mapping Different Rated Faults (for Cisbaikalia Example) <i>G. N. Ivanchenko, E. M. Gorbunova, A. V. Cheremnykh</i>	66
The Relationship between the Land Surface Temperature and Land Cover Types, a Case Study in Hanoi, Vietnam <i>Le Hung Trinh, V. R. Zablotskii, I. V. Zenkov, Danh Tuyen Vu, Khanh Hoai Dao</i>	84

---

---

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**КОГЕРЕНТНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ КОМПОНЕНТОВ ГЛОБАЛЬНОЙ  
КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МЕДЛЕННЫМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ  
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ  
И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**© 2022 г. **О. М. Покровский<sup>а</sup>, \*, И. О. Покровский<sup>а</sup>**<sup>а</sup>*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия**\*E-mail: pokrov\_06@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.07.2020 г.

Появление обширных данных дистанционного зондирования, атмосферы, океана и криосферы открыло новые возможности для изучения причин и механизмов естественных колебаний климата. Выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры вод поверхностного океанического слоя и для глубин океана до 700 м в северном полушарии как отклик на соответствующие модуляции солнечной активности. Показано, что, учитывая нестационарный характер климатических рядов, наиболее подходящим методом анализа является расчет вейвлет и кросс вейвлет спектров. Обнаружено, что максимумы 11-летних солнечных циклов подчиняются долговременным модуляциям с широким спектром квази-периодичностей, в котором выделяются: интервалы 60–80 летних, а также квази-вековых и квази-двухвековых колебаний. Указанные колебания транслируются также в соответствующие осцилляции глобальной температуры приземного воздуха (ТПВ) и потоков уходящего длинноволнового излучения. Долговременные модуляции с квази-периодом 60–80 лет, которые мы называем, следуя предшествующим исследователям, фундаментальным климатическим колебанием (ФКК), переходят далее внутри климатической системы в выявленные колебания площади ледового и снежного покрытия в северном полушарии, полученных исключительно по данным дистанционного зондирования, сохраняя квазипериодичности, заданные флукутациями солнечной активности. Показано, что в свою очередь ФКК повторяется в рядах спутниковых данных альтиметрических измерений уровня мирового океана. Более того, рост концентрации углекислого газа в атмосфере также подвержен влиянию модуляций солнечной активности, что, вероятно, объясняется вынужденными флукутациями температуры вод океана, который является главным контейнером углерода и CO<sub>2</sub>. Таким образом, если говорить о естественных колебаниях климата полувекового, векового и двухвекового масштабов, можно говорить о когерентности таких колебаний, с одной стороны, и осцилляций солнечной активности, как внешнего возмущающего фактора, с другой стороны.

*Ключевые слова:* климатические колебания, вейвлет анализ, солнечная активность, температура приземного воздуха, температура поверхности океана, температура глубинных вод океана, площадь ледового и снежного покрова, уровень океана, альтиметрия, концентрация CO<sub>2</sub>

DOI: 10.31857/S0205961422030083

**ВВЕДЕНИЕ**

На протяжении многих десятилетий исследователи солнечной активности изучали ее колебания. Сначала – на основе регистрации чисел Вольфа, а затем – путем актинометрических измерений на поверхности Земли и с борта космических аппаратов (Кондратьев, 1965; Kondratyev, 1999). Наряду с хорошо известным 11-летним циклом были выявлены полувековые, вековые и двухвековые квази-периодические колебания (Вигинский, 1973; Наговицын, 1997; Хромов, 1973; Gleissberg, 1973). Однако, о трех последних колебаниях обычно говорят как об эмпирических понятиях, поскольку

они не были строго доказаны. Отметим лишь некоторые работы К.Я. Кондратьева, где представлен анализ климатообразующих параметров, доступных для наблюдения из космоса (Кондратьев К.Я., Биненко В.И., 1984; Кондратьев, 1988, Кондратьев, Крапивин 2004). В недавней работе (Dima, et al., 2005) рассматривались взаимосвязи между колебаниями солнечной активности и климатическими индексами на декадном временном масштабе.

Новый математический инструментарий, вейвлет анализ, позволил не только получить более точные и строгие оценки квази-периодичностей солнечной активности, но также выявить реак-

цию температуры поверхности океана (ТПО) на это внешнее воздействие (Покровский, Покровский, 2020). Более того, удалось обнаружить, что в колебаниях климатических рядов ТПО не только в тропической зоне, но и во внетропических широтах Атлантического и Тихого океанов присутствуют аналогичные квази-периодичности, которые наблюдаются в исходном ряду значений солнечной активности (Покровский, Покровский, 2020). Таким образом, формируется концепция климатической системы Земли как сложнейшего нелинейного осциллятора, реагирующего на внешние квазипериодические колебания, главным источником которых является солнечная энергия.

Возникает естественный вопрос, а как другие компоненты климатической системы реагируют на медленные колебания солнечной активности, учитывая наличие многочисленных прямых и обратных связей между этими компонентами. К числу последних относятся: температура атмосферы и различных слоев океана, радиационный баланс и уходящая длинноволновая радиация, атмосферные осадки, площадь арктических льдов и снежного покрова, уровень Мирового океана, концентрация углекислого газа в атмосфере. Цель данной работы состоит в изложении результатов наших исследований для получения ответов на поставленный вопрос.

### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Большая часть использованных данных получена с привлечением спутниковых данных дистанционного зондирования в трех средах: атмосфера, гидросфера и криосфера. В связи с происходящими климатическими изменениями ключевым параметром считается температура атмосферного воздуха. Несколько мировых центров подготавливают ряды температур приземного воздуха (ТПВ) или surface air temperature (SAT) – в английском оригинале. Наиболее широко используются американские и британские массивы данных. Уточненные ряды глобальной температуры воздуха CRUTEM-3, 4, 5 даны на сайте британского климатического центра MetOffice университета восточной Англии (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/>) и описаны в работе (Brohan, et al., 2006; Jones, et al., 2012). Одновременно использовались комбинированные данные SAT и SST (температура поверхности океана) (Morice, et al., 2012). Эти архивы называются HadCRUT 4 и 5. Методики получения и обработки данных для британских климатических архивов представлены в работе (Rayner, et al., 2003).

Для изучения средней температуры слоев океана от поверхности до глубин 700 и 2000 м ис-

пользовался климатический архив температур и теплоемкостей, представленный на сайте NODC (National Oceanographic Data Center) США, в разделе [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT/](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/).

Массив данных по уходящей длинноволновой радиации (УДР) описан в работе (Liebmann, Smith, 1996). Глобальные и региональные данные заимствованы с сайта [https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.interp\\_OLR.html](https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.interp_OLR.html).

Климатические ряды месячных и среднегодовых значений площади снежного покрова в северном полушарии были заимствованы из данных NOAA США (<https://psl.noaa.gov/thredds/catalog/Datasets/snowcover/>), а месячные и годовые спутниковые данные по площади арктического льда в Северном Ледовитом океане из архивов Национального ледового Центра США (<https://nsidc.org/data/g02135>).

Архивы альтиметрических спутниковых изменений уровня океана, начиная с 1993 г., представлены на сайте океанической лаборатории университета Колорадо (США) (<http://sealevel.colorado.edu/>). Авторы статьи (Church, White, 2011) добавили к указанному архиву значения, реконструированные за предшествующие 113 лет. Они основаны на данных инструментальных измерений береговой сети.

Длинные ряды концентрации углекислого газа в атмосфере также имеются на многих порталах. Например, (Historical CO<sub>2</sub> data, 2018). Анализ данных приведен в работе (Etheridge, et al, 1996). Однако, из-за косвенного характера таких данных, наиболее надежными являются инструментальные измерения концентрации CO<sub>2</sub>, полученные начиная с 1955 г. по настоящее время на фоновой станции Мауно-Лоа (Keeling, et al, 1976). Данные можно найти, например, на сайте NOAA <ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/>.

Остановимся на методике анализа климатических данных. В соответствии с принятым общим подходом при анализе нестационарных рядов сначала вычисляется линейный тренд, который затем вычитается из исходного ряда. В предыдущей работе (Покровский, 2010) был предложен метод сглаживания нестационарных рядов наблюдений, который позволил выявить согласованные медленные колебания основных климатических индексов. Для независимого подтверждения полученных результатов целесообразно применить спектральный метод анализа. Именно вейвлет анализ позволяет оперировать с нестационарными рядами в отличие от классического Фурье анализа. Вейвлет анализ в науках о Земле предназначен для спектрального анализа как локальных (по временной координате), так и глобальных вариаций амплитуд климатических рядов (Torrence and Compo, 1998). После преобразования временных рядов в частотно-временную

область данный метод позволяет выявить максимальные значения спектральных амплитуд, локализованные по временной оси, по годам, для определенных важнейших квази-периодичностей (квази-частот) климатических рядов. Формулы преобразования одномерного ряда в двумерный частотно-временной образ и соответствующий вычислительный алгоритм даны в работе (Torrence and Compo, 1998), а для климатических приложений, также в (Покровский, 2010). Два свойства вейвлетов определяют их преимущества по отношению к другим спектральным методам, например, Фурье анализу (Jenkins, and Watts, 1968). Первое – любой вертикальный разрез двумерного вейвлет спектра пропорционален одномерному преобразованию Фурье для данного момента времени. Таким образом, вейвлет выявляет нестационарность климатических рядов в количественной форме. Второе – интервал детектируемых периодичностей получаемого спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда (Daubechies, 1990).

В заключение этой части отметим, что нами используются вейвлеты с функцией преобразования Морли (Daubechies, 1990) на основе алгоритма (Torrence and Compo, 1998). Для того, чтобы повысить надежность полученных выводов нами параллельно проводились расчеты также и по альтернативной схеме расчетов вейвлет спектров, изложенной в (Grinsted, et al, 2004).

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЯДОВ

Обычный корреляционный анализ климатических рядов не дает удовлетворительных результатов в виду того, что исследуемые ряды являются нестационарными. Когерентность вейвлет-преобразования используется для нахождения меняющихся корреляций между сигналами. Чаще всего когерентность вейвлета используется для нахождения коррелированных областей между сигналами, которые не коррелируют большую часть времени. Метод WTC (wavelet transform coherence) (Grinsted, et al., 2004) предоставляет информацию о силе взаимосвязи в виде частотно-временной карты. Таким образом, соответствующие характеристики сигнала могут быть получены в определенных частотных зонах и временных точках. Желаемое разрешение может быть получено одновременно для каждой характеристики сигнала: более высокое временное разрешение для более высоких частот и более высокое пространственное разрешение для более низких частот.

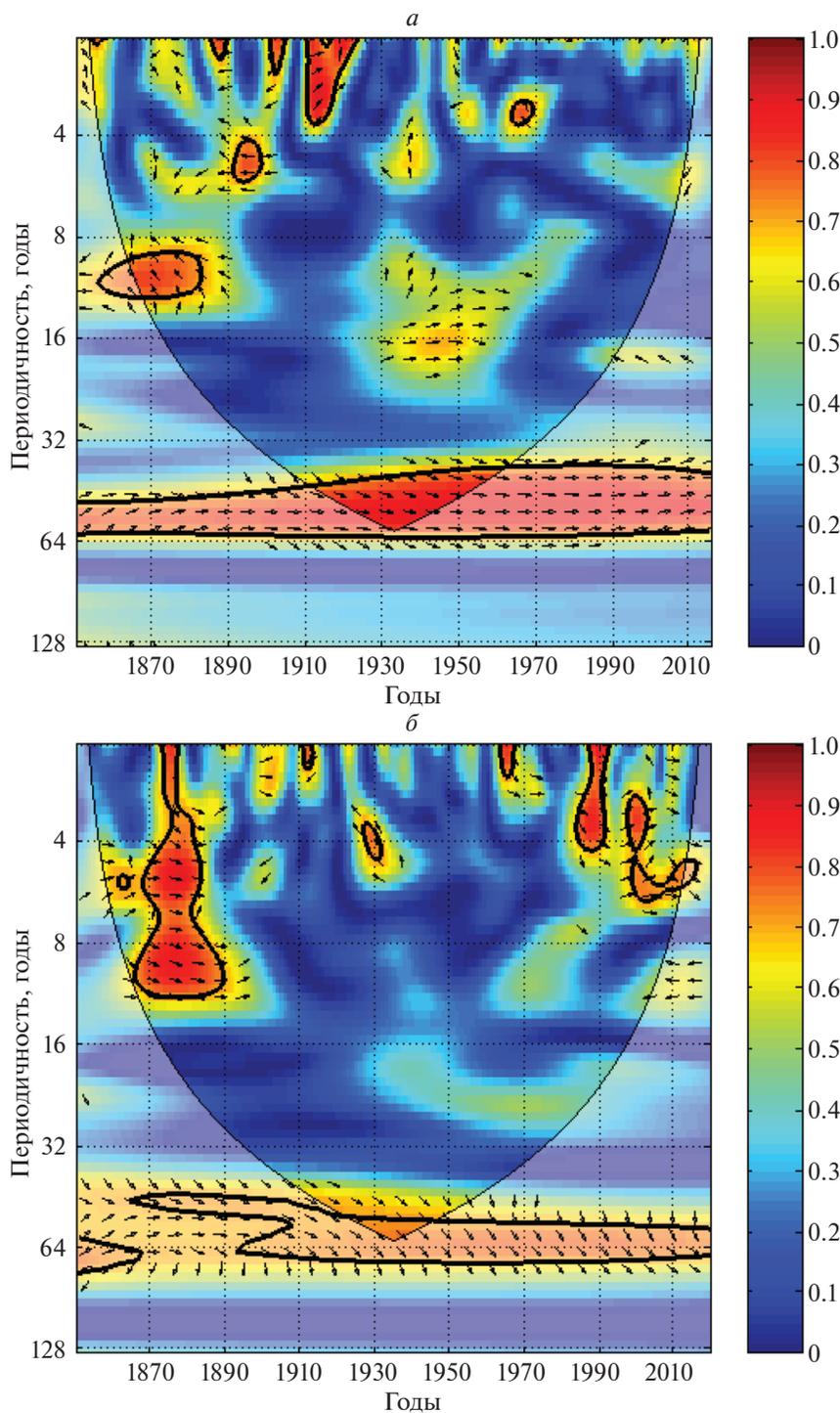
В предшествующей работе (Покровский, Покровский, 2020) мы сопоставляли вейвлет спектры для разных климатических рядов. Теперь мы переходим к анализу на основе технологии WTC (Grinsted, et al., 2004), которая позволяет количе-

ственно оценить временные и частотные области, где наблюдаются существенные связи колебаний климатических рядов. Более того, что не менее важно, имеется возможность оценить фазовые сдвиги, характеризующие временные лаги при сопоставлении колебаний рядов.

Поскольку мы предполагаем, что источником колебаний климатической системы являются флуктуации солнечной активности, начнем с анализа кросс-вейвлет спектра рядов чисел Вольфа и индекса температуры поверхности Тихого океана в тропиках Niño 1.2. Именно тропическая зона Тихого океана поглощает наибольшую долю приходящей солнечной энергии. Здесь же имеет место феномен Эль-Ниньо и берет начало глобальный океанический конвейер. WTC спектр представлен на рис. 1, а. Области, где оценки имеют 5%-ый уровень статистической значимости выделены сплошными линиями черного цвета. Кроме изолиний, указывающих нормированные значения, можно видеть множество стрелок, направления которых дает информацию о фазовых сдвигах. Они дают представления о временных лагах между рядами (Grinsted, et al., 2004). Направление по горизонтали слева направо означает синфазность колебаний обоих рядов, обратное направление – противофазность. Направление вниз означает сдвиг по фазе на  $90^\circ$ , вверх – на  $270^\circ$ . Перевод во временные лаги осуществляется для каждой периодичности отдельно.

На рис. 1, а выделяется 2 области периодичностей: малых значений 2–4, 8–11 лет и больших значений 60–65 лет. Первые отражают колебания в зоне Эль Ниньо, генерированные 11-летним циклом солнечной активности SSN, вторые – фундаментальное климатическое колебание (ФКК) (Покровский, Покровский, 2020). То, что стрелки параллельно направлены слева направо внутри области ФКК указывает, что медленные колебания солнечной активности SSN находятся в согласованной фазе с генерированными флуктуациями температуры океана в зоне Эль Ниньо. В короткопериодных областях такой синфазности не наблюдается. Для других индексов Эль Ниньо наблюдается сходная связь с рядом SSN. Также обнаружено, что ФКК транслируется из последовательности значений индексов Эль Ниньо в соответствующее колебание декадной тихоокеанской осцилляции (PDO). Тесная связь обнаруживается между колебаниями ТПО в двух океанах Тихом и Атлантическом. Кросс вейвлет анализ рядов PDO и АМО выявил не только полноценную трансляцию ФКК из одного океана в другой, но позволил оценить фазу запаздывания, составляющую 16–17 лет, что согласуется с результатами ряда работ.

На рис. 1, б представлены результаты кросс-вейвлет анализа между рядами солнечной актив-



**Рис. 1.** Карта вейвлет когерентности между стандартизованными временными рядами: *a* – солнечной активности SSN и Nino 1,2; *б* – солнечной активности SSN и годовой температуры поверхности океана и приземного воздуха HadCRUT 5 (северное полушарие). Области с уровнем значимости 5% относительно “броуновского шума” выделены черными линиями. Почти все статистически значимые области показывают согласованное направления стрелок и одинаковое поведение в частотно-временном пространстве.

ности и аномалий средней годовой температуры поверхности океана и приземного воздуха во всем северном полушарии HadCRUT 5. Основные чер-

ты приводимой карты сохраняются. Те же области малых и больших периодичностей. Область периодичности около 64 лет ФКК отличается

тем, что стрелки фазового сдвига направлены почти вниз. Это означает, что соответствующий временной лаг составляет 7–8 лет. Именно с такой задержкой температура поверхности океана и приземного воздуха в северном полушарии в среднем реагирует на медленные флуктуации солнечной активности. Аналогичные расчеты были проведены для других пар климатических рядов.

Их результаты показывают, что ФКК транслируется в большинстве из них. Ограничение объема работы не позволяют привести все карты кросс вейвлет анализа.

### ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА НА ПРИЛЕЖАЩИЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

На первой стадии исследования (Покровский, Покровский, 2020) были выявлены 4 зоны квазипериодических колебаний (КПК): 1) 11-летняя, 2) 60–80 летняя, 3) 110–120 летняя и 4) 230–250 летняя. Эти зоны по-разному проявились в спектрах солнечной активности и ТПО в тропиках и в умеренных широтах северного полушария. Первая зона КПК локализуется по временной оси и некоторым образом связана с явлением Эль-Ниньо, вторая – с медленным колебанием амплитуд 11-летнего солнечного цикла и проявляется в фундаментальном климатическом колебании ТПО, третья и четвертая – с вековыми колебаниями солнечной активности (Gleissberg, 1973).

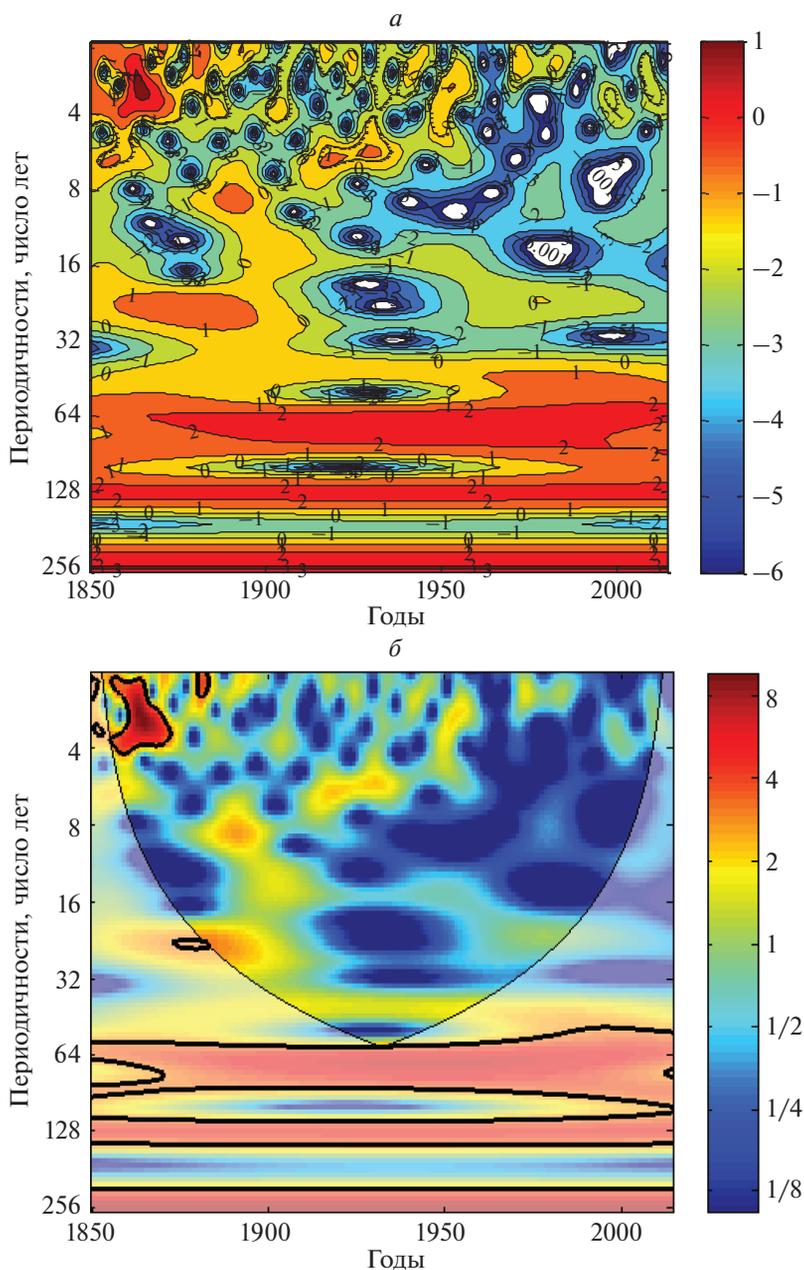
Первоначально мы исследовали спектр рядов ТПО для северного полушария и глобального масштаба. Результаты оказались сходными с теми, что были получены в предыдущей работе. После этого мы перешли к анализу соответствующих рядов температуры атмосферного воздуха над сушей. Существует уже 4 версии рядов CRUTEM-1, 2, 3, 4, созданные за разные годы, начиная с 1999 г. Версия CRUTEM-3 подверглась переработке после известного кризиса CLIMATE-GATE 2008 г. на всемирной климатической конференции в Копенгагене. Следующая версия CRUTEM-4 считается наиболее надежной до настоящего времени и используется большинством специалистов. Максимальные расхождения между 3-ей и 4-ой версиями достигает 1°C в интервале 1880–1900 гг., что сопоставимо со всем глобальным потеплением за весь 20-й век. При этом минимум глобальной температуры в конце 19-го–начале 20-го века, присутствующий во всех более ранних версиях, исчез в 4-й версии.

На рис. 2, а представлен вейвлет спектр для ряда CRUTEM-3, полученный по алгоритму (Torrence and Compo, 1998). На нем представлены все ранее обсуждавшиеся аномальные зоны спек-

тральной плотности вейвлета (СПВ). На рис. 2, б представлен вейвлет спектр для ряда CRUTEM-3, полученный по алгоритму (Grinsted, et al, 2004). Черными кривыми выделены области со статистической значимостью, отвечающей вероятности более 95%. На рис. 2, а используется шкала отрицательных и положительных степеней числа 2, а на рис. 2, б соответствующие дроби и целые числа. Таким образом, локализация аномалий СПВ и их значения, полученные двумя независимыми алгоритмами, хорошо согласуются и приводят к одинаковым выводам относительно того, что глобальная температура атмосферного воздуха подчиняется колебаниям внешней возмущающей силы – солнечной активности (Покровский, Покровский, 2020). Все последующие результаты получены проверкой на обоих независимых алгоритмах и поэтому заслуживают доверия.

Аналогичны е исследования были проведены для климатических рядов HadCRUTEM-3,4 для объединения ТПО и температуры воздуха над сушей. Глобальные значения и те, которые соответствуют наблюдениям в северном полушарии, дают сходные результаты из-за того, что объем наблюдений в южном полушарии стал значительным лишь в последние столетия. Ход аномалий HadCRUTEM-4 (рис. 3, а) демонстрирует наличие медленных колебаний глобальной температуры с периодом порядка 60–80 лет. Данные рис. 3, б подтверждают и детализируют информацию о медленных колебаниях в трех упомянутых ранее временных интервалах. Зоны максимальных значений СПВ, выделенные черными кривыми, статистически значимы с вероятностью 95%.

Одним из первых, измеряемых со спутника, климатическим параметром был поток уходящего длинноволнового излучения, регистрируемого в “окне прозрачности” атмосферы 8–12 мкм. К настоящему времени данные многочисленных спутников систематизированы, проконтролированы (для исключения грубых погрешностей) и проинтерполированы по временной и пространственным координатам (Liebmann, and Smith, 1996). Это позволило получить соответствующие региональные и глобальные климатические ряды. Из физических соображений (Кондратьев, 1988) следует, что величина потока уходящего длинноволнового излучения определяется радиационной температурой подстилающей поверхности (океан, суша). Поэтому неудивительно, что конфигурация климатического ряда и соответствующего вейвлет спектра повторяет основные черты графиков и рисунков для архива HadCRUTEM объединения ТПО и температуры воздуха над сушей. Роль облачности в радиационном балансе Земли известна (К). В этой связи стоит напомнить еще один факт. В недавней работе (Покровский, 2019) показано, что динамика глобального



**Рис. 2.** Вейвлет анализ климатического ряда аномалий среднегодовых значений глобальной температуры приземного воздуха CRUTEM-3 (Brohan, et al., 2006): *a* – алгоритм (Torrence and Compo, 1998); *б* – алгоритм (Grinsted, et al., 2004). Зоны максимальных значений, выделенные черными кривыми, статистически значимы с вероятностью 95%.

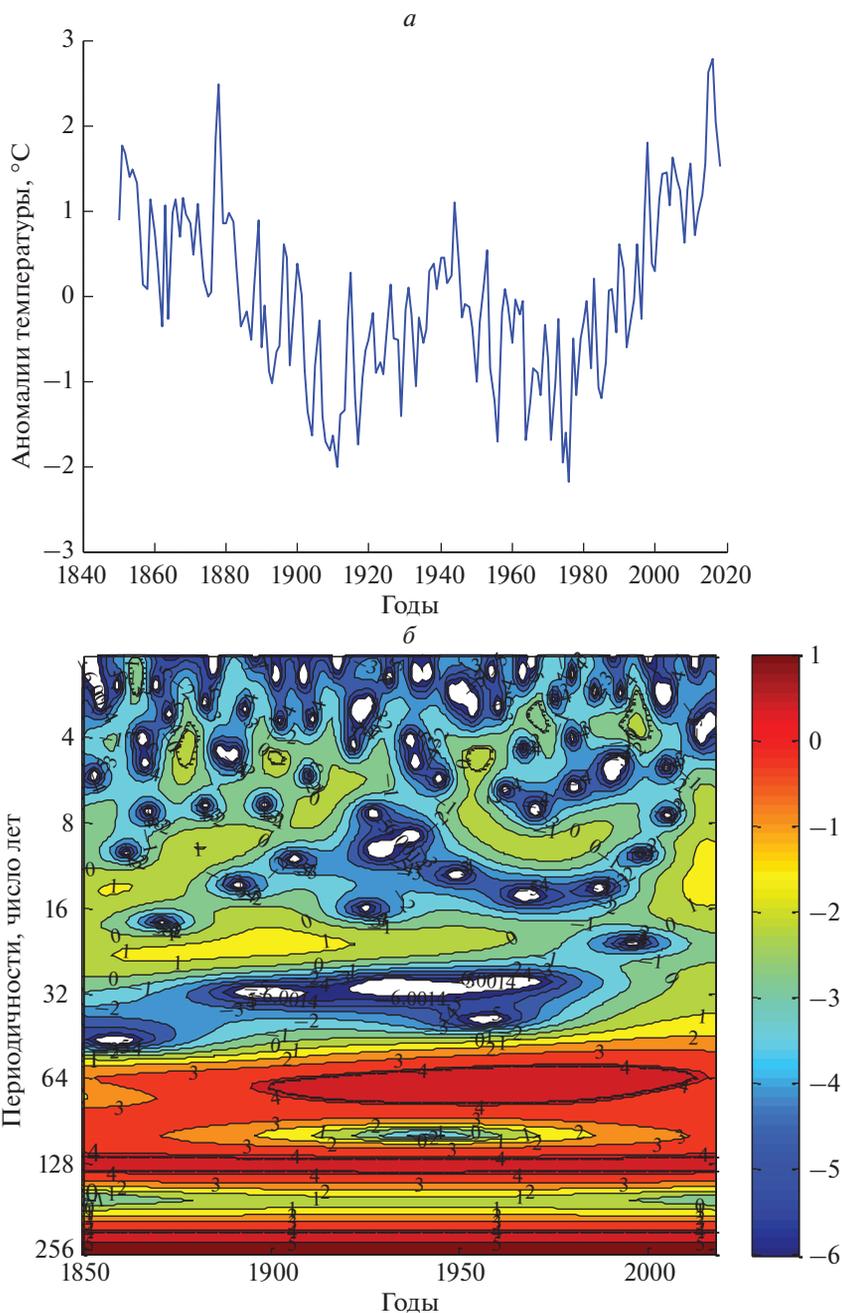
количества облаков и значений облачного покрытия над Мировым океаном также демонстрируют наличие отмеченных выше квази-периодических колебаний.

Таким образом, колебания солнечной активности через нагрев поверхности океана передаются к приземному слою атмосферы и определяют осцилляции климата на Земле. Перенос тепла в водной среде осуществляется не столь прямолинейно. Большой удельный вес, теплоемкость и

плотность воды влечет за собой сложную систему циркуляции, включая сеть поверхностных и глубинных океанических течений.

#### ТЕМПЕРАТУРА ВОД В ГЛУБИННЫХ СЛОЯХ ОКЕАНА

В прошедшие десятилетия расширились исследования Мирового океана с помощью различных средств наблюдений. Кроме стационарных и маршрутных судовых наблюдений появилась и

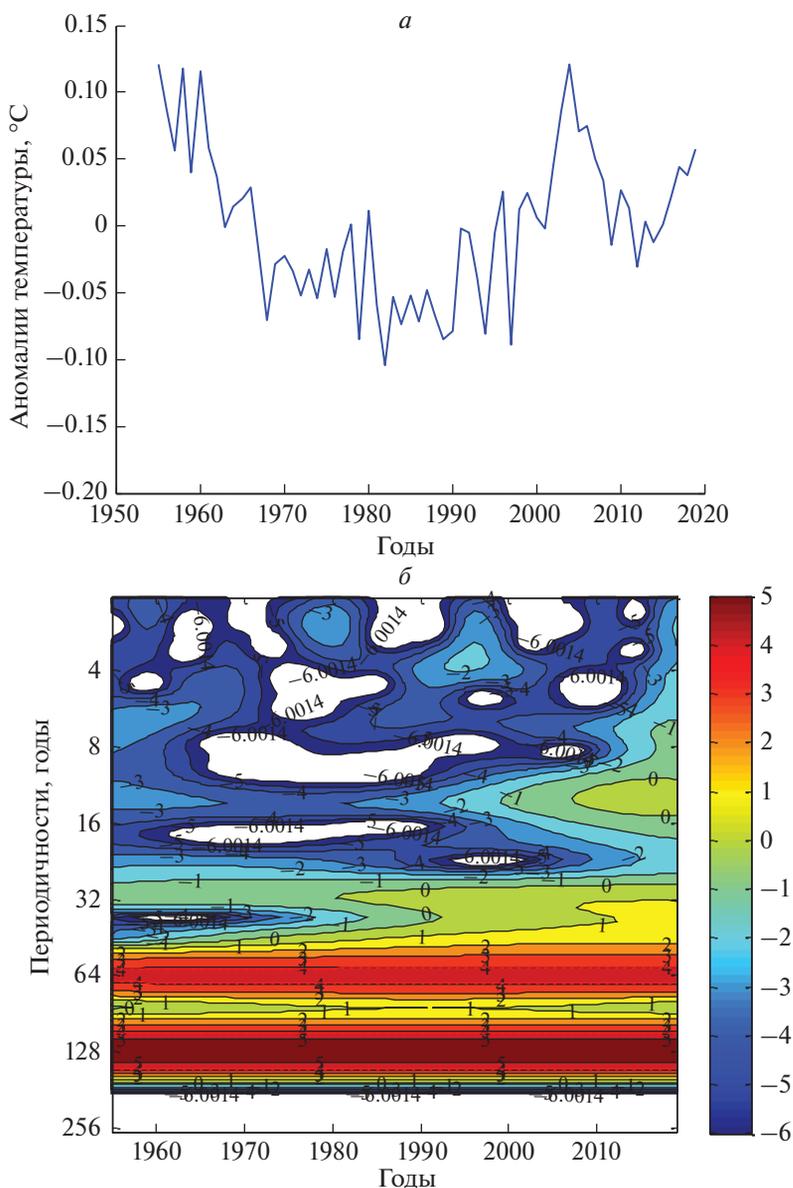


**Рис. 3.** Анализ климатического ряда аномалий глобальных значений HadCRUT 3.4 для объединения ТПО и температуры воздуха над сушей: *a* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

стала доминирующей сеть буйковых автоматических станций, осуществляющих регулярные глубинные зондирования и передающих информацию через спутники связи. Осуществляется ряд международных проектов, включая крупнейший и наиболее продолжительный проект ARGO (Argo Steering Team, 1998). Флот ARGO состоит из почти 4000 буев. Исследования на основе полученных измерений, в частности, позволили получить климатические ряды средней температуры

верхнего слоя океана в интервалах глубин 0–700 и 0–2000 м (Levitus, et al, 2012). Эти данные детализированы для северной части Атлантического и Тихого океанов, оказывающих доминирующее влияние на формирование климата Евразии и Северной Америки.

Мы рассмотрели 3 ряда данных средних температур в обоих интервалах глубин за 1955–2019 гг.: 1) Северная Атлантика, 2) северная часть Тихого океана, 3) Мировой океан. Анализ показывает,



**Рис. 4.** Анализ климатического ряда аномалий средней температуры глубинных вод (0–700 м) в Северной Атлантике (Levitus, et al., 2012): *a* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

что ввиду существенного доминирования числа наблюдений в 1-м регионе по сравнению со 2-м регионом обнаруживается близость графиков для аномалий средних температур в 1-м и 3-м регионах. Аномалии средней температуры глубинных вод (0–700 м) в Северной Атлантике (рис. 4, *a*) “запаздывают” по фазе примерно на 18 лет по отношению к северной части Тихого океана. Этот феномен отмечался ранее при регрессионном анализе рядов для поверхностных вод (Покровский, 2019). Это лишний раз подтверждает справедливость теории “глобального конвейера” в Мировом океане (Brocker, 1985). Согласно ей вре-

мя перемещения макромасштабных глубинных масс воды из Тихого в Атлантический океан и обратно составляет несколько десятилетий.

Несмотря на то, что длина рядов средней температуры глубинных вод океана составляет около 65 лет, вейвлет анализ позволяет выявить периодичности большего временного масштаба. Данные рис. 4, *б* показывают, что вейвлет анализ уверенно (с 95% вероятностью) воспроизводит две долгопериодные аномалии спектральной плотности 60–80 лет и 110–130 лет. Влияние 11-летнего цикла и связанного с ним феномена Эль-Ниньо не обнаруживается в колебаниях температур

глубинных вод не только в Атлантическом, но и в Тихом океане. И только медленные модуляции экстремумов солнечной активности оказывают воздействие на колебания температуры глубинных вод.

### СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И МОРСКОЙ ЛЕД

Основным источником пополнения вод океана являются осадки, количество которых зависит от скорости испарения, которая определяется температурой водной поверхности. В работе (Покровский, 2019) исследованы ряды глобальной облачности и осадков, которые демонстрируют медленные колебания, сходные с описанными выше. Потепление климата повлекло за собой сокращение площади снежного и ледового покрова. В 20-м веке накоплена информация о площади льда в шельфовых российских арктических морях (Polyakov, Johnson, 2000; Polyakov, et al., 2003). Анализ климатических рядов (Pokrovsky, 2009) выявил наличие медленных 60–80 летних колебаний площади льда в Баренцевом, Карском, Чукотском морях и море Лаптевых.

Начиная с 1979 г., появляются спутниковые оценки площади ледового покрытия всей акватории Арктики. На рис. 5, а представлен график значений аномалий (отклонений от линейного тренда) среднегодовой площади ледового покрытия Северного Ледовитого океана за 1979–2019 гг. Можно выделить 3 периода изменений этой характеристики: 1) быстрое сокращение площади льда в 80-е годы, 2) стабильное уменьшение в 90-е годы, и 3) замедление этого процесса в начале 21-го века, за исключением отдельных лет. Это обстоятельство указывает на нестационарность данного процесса. Поэтому неудивительно, что вейвлет спектр указанного временного ряда (рис. 4, б) демонстрирует наличие медленного климатического колебания, располагающегося в интервале 60–80 лет. Это колебание статистически значимо с вероятностью 95%. Отметим, что в работах (Polyakov, Johnson, 2000; Pokrovsky, 2009) на базе 100-летнего климатического ряда для российских шельфовых морей (Баренцево, Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское) за весь 20-й век также обнаруживалось указанное колебание. Это означает, что влияние модулированного колебания солнечной активности сказывается даже на климатические изменения в Арктике.

Аналогичное исследование было проведено для общей площади снежного покрова северного полушария. Соответствующий архив климатических данных описан в работе (Robinson, et al., 2012). Там же изложена методика обработки комбинации наземных и спутниковых данных и получения климатических рядов за зимние сезоны на период, начиная с 1967 г. Динамика изменения аномалий (отклонений от линейного тренда)

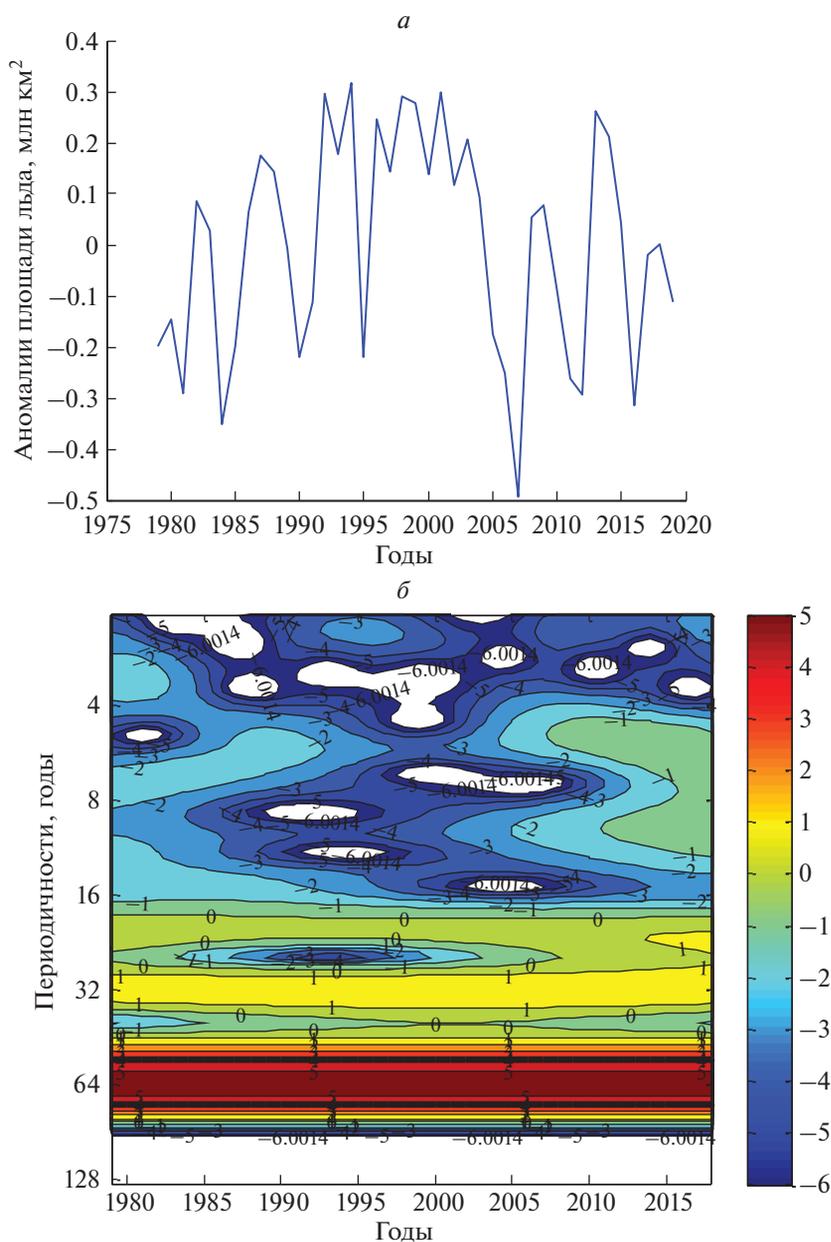
среднегодовой площади снежного покрова позволяет отметить следующие особенности: 1) ускоренное сокращение площади в 70-е годы и в начале 80-х годов; 2) стабильное замедляющееся сокращение, начиная с 90-х годов. Вейвлет спектр указанного временного ряда обнаруживает наличие двух медленных климатических колебаний, располагающихся в интервалах 60–80 лет и 110–130 лет. Кроме того, в период 1967–1998 гг. обнаруживается статистически значимое колебание с периодичностью 6–8 лет, что косвенно указывает на вероятную роль Эль-Ниньо в межгодовых колебаниях площади снежного покрова.

### ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В современных климатических исследованиях невозможно обойти эту тему (Кондратьев, Крапивин, 1988). Связь этих процессов очевидна. Подъем уровня Мирового океана влечет за собой увеличение площади соприкосновения атмосферы и океана. С другой стороны, это приводит к увеличению газообмена между этими двумя средами. А согласно результатам многочисленных работ (см. сводку в Sorensen, 1979), а также доля обмена углекислым газом между атмосферой и океаном достигает 80% в общем балансе  $\text{CO}_2$  в атмосфере (Кондратьев, Крапивин, 1988). Таким образом, подъем уровня океана неизбежно приводит к изменению концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере за счет естественных источников и стоков в океане.

Подъем уровня океана, начиная с 1993 г., обнаруживается по альтиметрическим спутниковым измерениям. На графике аномалий (отклонения от линейного тренда) среднегодовых значений уровня океана (не представлен) обнаруживается отрицательная аномалия в 2006–2014 гг. с минимумом в 2011 г., составляющим около 6 мм. Вейвлет спектр (рис. 6, а) обнаруживает фундаментальное колебание процесса подъема уровня океанических вод в интервале периодичностей 60–80 лет. Наряду с ним выявляется более слабая квазипериодичность, имеющая полупериод около 30 лет.

Учитывая, что наиболее интенсивным является обмен углекислым газом между атмосферой и океаном (Кондратьев, Крапивин, 2004), а с подъемом уровня мирового океана площадь его поверхности возрастает, неудивительно, что колебания обеих характеристик являются когерентно. Это видно из данных рис. 6, а и 6, б. Напомним, что интервал детектируемых периодичностей получаемого вейвлет спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда (Daubechies, 1990). Альтиметрические данные ис-



**Рис. 5.** Анализ климатического ряда аномалий среднегодовой площади ледового покрытия акватории Северного Ледовитого океана по данным спутниковых наблюдений с 1979 г.: *а* – временной ряд стандартизованных аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

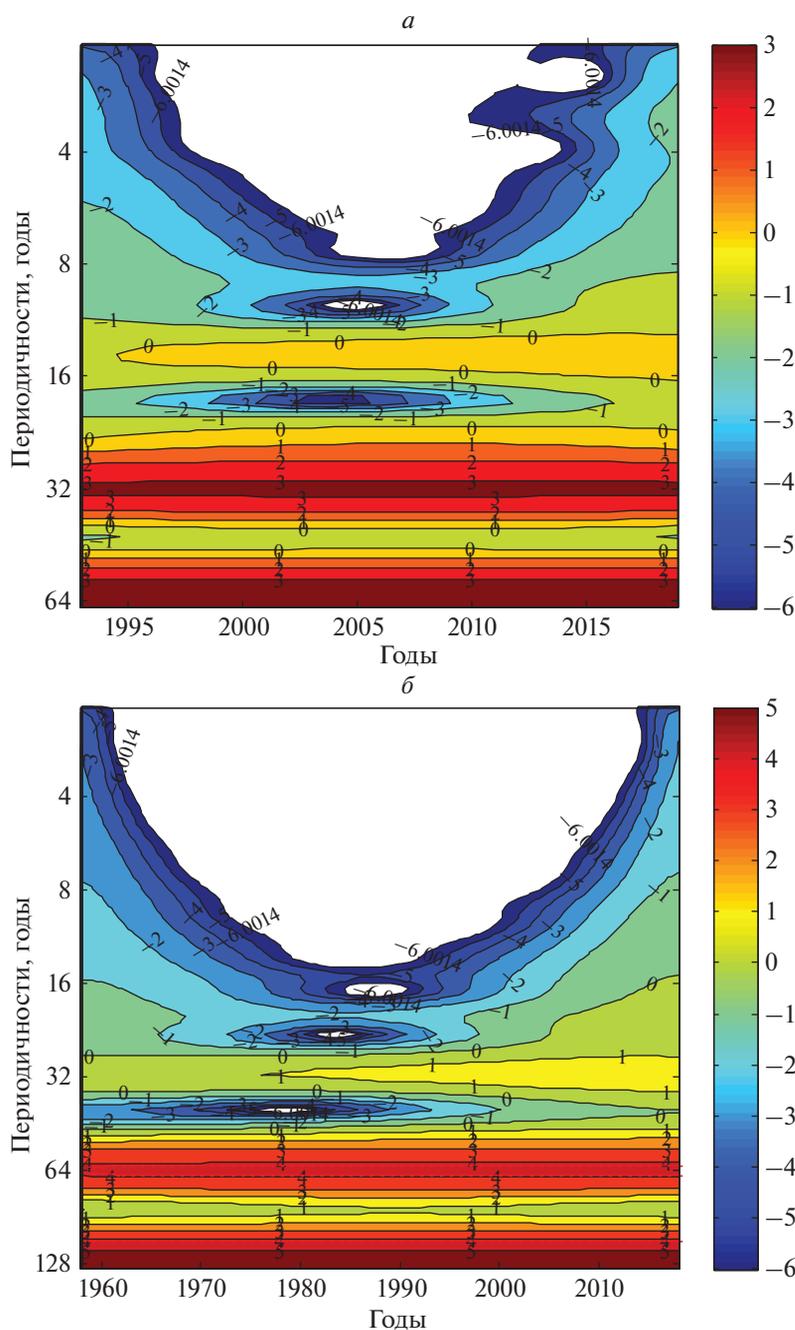
пользовались за 30 лет, а измерения концентрации  $\text{CO}_2$  – за 65 лет.

Мы ограничились рассмотрением климатического ряда среднегодовых концентраций  $\text{CO}_2$ , полученных из измерений на фоновой станции Мауно-Лоа, начиная с 1955 г. Аномалии временного ряда аномалий (отклонений от линейного тренда) имеют положительный знак везде, кроме интервала 1970–2005 гг., где отрицательная аномалия достигает почти 5 ppm. Соответствующий вейвлет спектр (рис. 6, б) выявляет фундамен-

тальное колебание в интервале 60–80 лет и вековую гармонику, локализованную в интервале 110–130 лет. Океан поглощает  $\text{CO}_2$ , являясь его основным стоком. И скорость этого поглощения согласно закону Генри о зависимости растворимости газов определяется поверхностной температурой океана.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все представленные результаты расчетов вейвлет спектров проверялись с помощью парал-



**Рис. 6.** Вейвлет анализ климатических рядов аномалий среднегодовых значений: *a* – уровня мирового океана (спутниковая альтиметрия) *б* – концентрации  $\text{CO}_2$  (станция Мауно-Лоа).

лельных вычислений по обоим алгоритмам (Grinsted, et al., 2004; Torrence, Compo, 1998), что исключает вероятность ошибки. Они привели к идентичным выводам для всех рассмотренных климатических параметров и временных интервалов. Содержательные выводы, отмеченные выше, подводят нас к заключению, что скрытые квазипериодические колебания (после исключения линейного тренда) солнечной активности

транслируются в соответствующие колебания основных компонентов климатической системы (океан, атмосфера, криосфера), а затем проявляются в изменениях производных параметров (уровень океана, глобальная облачность, концентрация  $\text{CO}_2$ , потоки длинноволновой радиации, площадь арктического льда). Исключение линейного тренда позволяет удалить влияние перехода от одной климатической эпохи (с масштабом

многих тысячелетий) к другой. Только применение современного аппарата спектрального анализа за нестационарных климатических рядов позволило выявить их скрытые квазипериодичности, и их согласованность с колебаниями солнечной активности. Возможности использования данных дистанционного зондирования космических аппаратов позволили более глубоко исследовать причины и механизмы происходящих изменений климата.

Таким образом, если говорить о естественных колебаниях климата полувекового, векового и двухвекового масштабов, можно говорить о когерентности таких колебаний, с одной стороны, и осцилляций солнечной активности, как внешнего возмущающего фактора, с другой стороны. Но этот вопрос требует дальнейшего изучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вигинский Ю.И.* Цикличность и прогнозы солнечной активности. JL: Наука. 1973, 275. с.
- Кондратьев, К.Я.* Актинометрия. — Л.: Гидрометеиздат, 1965. 690 с.
- Наговицын Ю.А.* Нелинейная математическая модель солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом // Письма в Астрон. Журнал. 1997 Т. 23. № 11–12. С. 859–862.
- Кондратьев К.Я.* Актинометрия // Л. Гидрометеиздат, 1965, 327 с.
- Кондратьев К.Я.* Радиационные факторы современных изменений глобального климата / Л.: Гидрометеиздат, 1980. 279 с.
- Кондратьев К.Я., Биненко В.И.* Влияние облачности на радиацию и климат // Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф.* Моделирование глобального круговорота углерода // М., ФизМатЛит, 2004, 336 с.
- Покровский О.М.* Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 11–24.
- Покровский О.М.* Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.
- Покровский О.М., Покровский И.О.* Идентификация фундаментального климатического колебания с помощью вейвлет анализа рядов наблюдений. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 57–72.
- Хромов С.П.* О некоторых спорных вопросах, относящихся к цикличности солнечной активности и ее предполагаемым связям с климатом // Метеорология и Гидрология. 1973. № 9. С. 93–98.
- Argo Steering Team.* On the design and Implementation of Argo — an initial plan for the global array of profiling floats // International CLIVAR Project Office Report, 1998, 21. P. 32.
- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // Nature, 1985. V. 315. P. 21–26.
- Church J.A., White N.J.* Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. // Survey Geophysics, 2011. V. 32. 585–602.
- Daubechies, I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dima M.G., Lohmann, Dima I.* Solar-induced and internal climate variability at decadal time scales // Int. J. Climatol. 2005. V. 25. P. 713–733.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // J. Geophys. Res., 1996. V. 101 (D2), P. 4115–4128.  
<https://doi.org/10.1029/95JD03410>
- Jenkins G.M., Watts D.G.* Spectral Analysis and Its Applications // Holden-Day, 1968. 525 p.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P.* Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. D05127.  
<https://doi.org/10.1029/2011JD017139>
- Gleissberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations // Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973, 246 p.
- Grinsted A., Moore I J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics, 2004. V. 11 P. 561–566.
- Keeling C.D., Bacastow R.B., Bainbridge A.E., Ekdahl C.A., Guenther P.R., Waterman L.S.* Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii // Tellus. V. 28. P. 538–551.
- Kondratyev, K. Ya.,* Climatic Effects of Aerosols and Clouds // Springer Praxis Books, 1999, 264 p.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M.* World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m) 1955–2010 // Geophys. Res. Lett., 2012. V. 39. L10603.  
<https://doi.org/10.1029/2012GL051106>
- Liebmann B., Smith C.A.* Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 1275–1277.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D.* Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset // J. Geophysical Research, 2012. V. 117. D08101.  
<https://doi.org/10.1029/2011JD017187>
- NH ice extent and area from <http://nsidc.org/data/g02135.html> [million km<sup>2</sup>] area covered with at least 15% ice.
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. In a book “Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic” (Ed. J.C.J. Nihoul, A.G. Kostianoy) // Springer Science Publ., 2009. P. 25–36.

*Polyakov I., Johnson M.A.* Arctic decadal and interdecadal variability // *Geophys. Res. Lett.*, 2000. V. 27. P. 4097–4100.

*Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas // *J. Climate*, 2003. V. 16. P. 2078–2075.

*Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan, A.* (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D14. 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>

*Robinson D.A., Estilow T.W., NOAA CDR Program* (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. Northern Hemisphere. // NOAA National Centers for Environmental Information.

<https://doi.org/10.7289/V5N014G9>

*Sorensen B.* Renewable Energy., N.Y. Academic Press, 1979, 682 p.

*Trenberth K.E., Paolino D.A.* The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities // *Mon. Wea. Rev.*, 1980. V. 108. P. 855–872.

*Torrence C., Compo G.* A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998. V. 79. P. 61–78.

## Coherence of Fluctuations of Components of the Global Climate System with Slow Fluctuations of Solar Activity According to Conventional and Satellite Observations

O. M. Pokrovsky<sup>1</sup> and I. O. Pokrovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

Slow climatic fluctuations of water temperature in the surface ocean layer and for the ocean depths up to 700 m in the Northern Hemisphere as a response to the corresponding modulations of solar activity were identified and studied. It is shown that, given the non-stationary nature of climate series, the most suitable method of analysis is the calculation of wavelet spectra. It was found that the maxima of 11-year solar cycles are subject to long-term modulations with a wide range of quasi-periods, in which the intervals of 60–80 years, as well as quasi-century and quasi-two-century fluctuations are distinguished. These fluctuations are also translated into corresponding oscillations of the global surface air temperature (SAT) and outgoing long-wave radiation (OLR) fluxes. Long-term modulations with a quasi-period of 60–80 years, which we call, following previous researchers, the fundamental climate oscillation (FCC), pass further within the climate system into the detected fluctuations in the area of ice and snow cover in the Northern Hemisphere, obtained exclusively from remote sensing data, while maintaining the quasi-periods set by fluctuations in solar activity. It is shown that, in turn, the FCC is repeated in the series of satellite data of altimetric measurements of the world ocean level. Moreover, the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere is also affected by modulations of solar activity, which is probably due to forced fluctuations in the temperature of the waters of the ocean, which is the main container of carbon and CO<sub>2</sub>. Thus, if we talk about natural climate fluctuations of half-century, century and two-century scales, we can talk about the coherence of such fluctuations, on the one hand, and solar activity oscillations, as an external disturbing factor, on the other hand.

**Keywords:** climate fluctuations, wavelet analysis, solar activity, surface air temperature, ocean surface temperature, ocean deep water temperature, ice and snow cover area, ocean level, altimetry, CO<sub>2</sub> concentration

### REFERENCES

*Viginsky Yu.I.* Tsiklichnost i prognozyi solnechnoy aktivnosti. [Cyclicity and forecasts of solar activity]. L: Nauka. 1973. 275 p. (In Russian)

*Nagovitsyn Yu.A.* Nelineynaya matematicheskaya model solnechnoy tsiklichnosti i vozmozhnosti dlya rekonstruktsii aktivnosti v proshlom. [A non-linear mathematical model of solar cyclicity and the possibility of reconstructing activity in the past] // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal* 1997. T. 23. № 11–12. P. 859–862. (In Russian)

*Pokrovsky O.M.* Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distantsionnykh i kontaknykh izmereniy, [Analysis of climate change factors according to distance and contact measurements] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010. № 5. P. 11–24. (In Russian)

*Pokrovsky O.M.* Izmeneniya oblachnosti v period globalnogo potepleniya po rezul'tatam mezhdunarodnogo sputnikovogo proekta. [Cloud change during global warming following

an international satellite project.] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009. № 1. P. 3–13.

*Khromov S.P.* O nekotorykh spornykh voprosakh, otnosyaschihsya k tsiklichnosti solnechnoy aktivnosti i ee predpolagaemyim svyazyam s klimatom [On some controversial issues related to the cyclical nature of solar activity and its alleged relationship with the climate.] // *Meteorologiya i gidrologiya*, 1973. № 9. P. 93. (In Russian)

*Argo Steering Team.* On the design and Implementation of Argo – an initial plan for the global array of profiling floats // *International CLIVAR Project Office Report*, 1998, 21. P. 32.

*Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*, 1985. V. 315. P. 21–26.

*Churchыы J.A., White N.J.* Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // *Survey Geophysics*, 2011. V. 32, 585–602.

- Daubechies I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dima M., G. Lohmann, Dima I.* Solar-induced and internal climate variability decadal time scales // Int. J. Climatol. 2005. V. 25. P. 713–733.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // J. Geophys. Res., 1996. V. 101 (D2). P. 4115–4128.  
https://doi.org/10.1029/95JD03410
- Jenkins G.M., Watts D.G.* Spectral Analysis and Its Applications // Holden-Day, 1968, 525 p.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P.* Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010 // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. D05127.  
https://doi.org/10.1029/2011JD017139
- Glaisberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations // Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973, 246 p.
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics, 2004. V. 11 P. 561–566.
- Keeling C.D., Bacastow R.B., Bainbridge A.E., Ekdahl C.A., Guenther P.R., Waterman L.S.* Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii // Tellus. V. 28. P. 538–551.
- Kondratyev K.Ya.* Actinometry // L. Gidrometeoizdat, 1965, 327 p.
- Kondratyev K.Ya.* Radiation factors of modern changes in the global climate // L.: Gidrometeoizdat, 1980. 279 p.
- Kondratyev K.Ya., Binenko V.I.* Influence of cloudiness on radiation and climate // L.: Gidrometeoizdat, 1984. 240 p.
- Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F.* Modeling of the global carbon cycle // M., FizMatLit, 2004, 336 p.
- Kondratyev K.Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds // Springer Praxis Books, 1999, 264 p.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M.* World Ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m) 1955–2010 // Geophys. Res. Lett., 2012. V. 39. L10603.  
https://doi.org/10.1029/2012GL051106
- Liebmann B., Smith C.A.* 1996: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset // Bulletin of the American Meteorological Society, 1996. V. 77. P. 1275–1277.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D.* Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset // J. Geophysical Research, 2012. V. 117. D08101.  
https://doi.org/10.1029/2011JD017187
- NH ice extent and area from <http://nsidc.org/data/g02135.html> [million km<sup>2</sup>] area covered with at least 15% ice.
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. In a book “Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic” (Ed. J.C.J. Nihoul, A.G. Kostianoy) // Springer Science Publ., 2009. P. 25–36.
- Polyakov I., Johnson M.A.* Arctic decadal and interdecadal variability // Geophys. Res. Lett., 2000. V. 27. P. 4097–4100.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas. J. Climate // 2003. 16. P. 2078–2075.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D14, 4407.  
https://doi.org/10.1029/2002JD002670.
- Robinson D.A., Estilow T.W., NOAA CDR Program* (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. Northern Hemisphere // NOAA National Centers for Environmental Information.  
https://doi.org/10.7289/V5N014G9
- Sorensen B.* Renewable Energy., N.Y. Academic Press, 1979, 682 p.
- Trenberth K.E., Paolino D.A.* The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities // Mon. Wea. Rev., 1980. V. 108. P. 855–872.
- Torrence C., Compo G.* A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society, 1998. V. 79. P. 61–78.

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ПОДВОДНЫХ ВОЗВЫШЕННОСТЕЙ  
БОГОРОВА, ТОЯМА И ПРИЛЕГАЮЩИХ УЧАСТКОВ ДНА  
ЯПОНСКОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ  
И КОСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ)**

© 2022 г. А. А. Гаврилов\*

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия**\*E-mail: gavrilo@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 09.08.2021 г.

При использовании 3D моделей цифрового рельефа, создаваемых на основе глобальной базы батиметрических данных и методик GEBCO 2014 в рамках программы Google Earth, впервые получены данные о качественных и количественных характеристиках структурных элементов подводных возвышенностей Богорова, Тояма и прилегающих участках дна Центральной котловины Японского моря. Установлено, что исследуемые возвышенности представляют собой комплексы палеовулканических построек центрального типа, образующих с разрывными нарушениями и узлами их пересечений единые тектономагматические системы. Определены параметры, морфологические характеристики, особенности внутреннего строения (типы инфраструктур) палеовулканических структур, выявлены пространственные и иерархические (два ранга) системы разрывных нарушений и очаговых образований. Крупные концентрические группировки палеовулканов идентифицируются с проекциями мантийных диапиров. Полученная информация позволяет с новых позиций оценить адекватность существующих моделей формирования и развития окраинно-континентальной впадины Японского моря.

*Ключевые слова:* Японское море, подводная возвышенность, вулканоструктура, линеамент, разлом, очаговая система, рельеф, цифровая модель, морфоструктура

DOI: 10.31857/S0205961422030058

**ВВЕДЕНИЕ**

Визуализация цифрового рельефа, создаваемая на основе глобальной базы батиметрических данных GEBCO 2014 при 3D моделировании (<http://Ocean3dprojects...>) и материалов дистанционного зондирования Земли из космоса в рамках программы Google Earth открывает принципиально новые возможности для изучения геоморфологии и геологии дна морей и океанов. Особенно целесообразно применение данных дешифрирования получаемых изображений при изучении подводных возвышенностей и выступов акустического фундамента, которые отличаются относительно небольшим чехлом рыхлых отложений. Основные задачи предлагаемой работы – индикация и идентификация структурных элементов подводных возвышенностей Богорова (ПВБ), Тояма (ПВТ) и прилегающих участков дна Японского моря на основе имеющейся в открытом доступе батиметрической GEBCO 2014 и космической информации (Google Earth), а также опыта применения методик геоморфологических, космогеологических и морфотектонических

исследований вулканогенных областей суши и дна прилегающих акваторий ряда территорий Дальнего Востока России (Гаврилов, 2017, 2020, 2021). В соответствии со спецификой геологического строения и развития региона главные объекты исследований – разрывные нарушения и очаговые структуры.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для увеличения контрастности и лучшего восприятия деталей изображения подводного рельефа копировались на прозрачную основу и анализировались при подсветке снизу. В качестве основных признаков линейных аномалий (линеаментов), соотносимых с зонами разрывных нарушений на изображениях (Google Earth), рассматривались: 1) протяженные (непрерывные или дискретные) узкие линейные или более широкие полосовые аномалии фототона, отличающиеся набором характерных черт, связанных с цветом, рисунком и структурой, или системой мелких деталей, элементов; 2) линейные границы разделов двух или более участков территории с

различным окрасом, плотностью фототона; 3) дуговые, прямолинейные контуры береговых линий континентальной и островной суши, впадин, поднятий, уступы континентального и островных склонов; 4) цепи, ряды кольцевых аномалий, блоков и других форм или морфоструктурных элементов рельефа, указывающих на линейную упорядоченность объектов в геологической и геоморфологической средах. Контроль выделяемыми линеаменами цепей кольцевых аномалий, соотносимых с палеовулканическими постройками, а также границ впадин и поднятий, связь с ними ориентировки грабен и горных хребтов подтверждают правомерность подобной интерпретации (Гаврилов, 2009, 2020, 2021). Ранее проведенные геоморфологические и геолого-геофизические исследования (Геология, 1987; *Geology...*, 1996) показали наличие на дне Японского моря многочисленных разрывных дислокаций следующих основных направлений: 270–275°, 310°, 350–0°, 10°, 20°, 45–55°, 65°, 80°. Были выделены и описаны Центрально-Японский, Тоямский, Садовский и другие региональные глубинные разломы, отчетливо выраженные в рельефе и геофизических полях (Геология..., 1987; Сигова, 1990).

Индикация очаговых систем на суше предполагает использование комплекса ландшафтных, геоморфологических, геологических, геофизических данных и материалов дистанционного зондирования из космоса. В зависимости от размеров, ранга, возраста выделяемых объектов и степени изученности территории набор используемых признаков и показателей меняется (Космическая геология, 1983; Кольцевые..., 1987 и др.). Постоянными признаками остаются: круговой, кольцевой рисунок и концентрическое строение выделяемых аномалий фотона, поля высот, геофизических полей; кольцевая геометрия геологических тел, структур; радиально-концентрическая зональность геоморфологических, геологических и геофизических характеристик объектов; наличие упорядоченного расположения элементов внутреннего строения — моно-полиядерного, ядерно-сателлитного и орбитально-сателлитного унифицированных типов инфраструктур (Гаврилов, 1990, 2017).

Более сложны индикация и идентификация линейных и кольцевых аномалий изображений дна акваторий на больших глубинах, где рельеф отображается на основе комплексирования данных, полученных различными системами спутниковой альтиметрии (цифровые модели высот геоида, уклонения отвесных линий, аномалий силы тяжести в свободном воздухе), результатов эхолотных съемок и измерений. Точность определений значений гравитационного поля может достигать 5 мгал, а разрешение изображений — 20 км. Считается, что в условиях расчлененного рельефа

с перепадом высот от нескольких сотен метров и более гравитационные аномалии в свободном воздухе в значительной степени отражают топографию, в то время как гравитационный эффект плотностных неоднородностей верхних этажей геологического разреза Земли играет второстепенную роль (Лебедев, 2013; Smith, Sandwell, 1994). В зоне сочленения суши и прилегающих акваторий программа Google Earth использует комплекты адаптированных друг к другу сканерных космических снимков местности (суша) и цифровых моделей рельефа дна прилегающих акваторий. Использование таких данных, как размеры островов, подводных возвышенностей, мысов и других реперных объектов, позволяет уточнить параметры выделяемых на изображениях линейных, кольцевых аномалий и соотносимых с ними природных объектов. Известно, что GEBCO 2014 объединяет данные международных, национальных, региональных научных и научно-производственных организаций, институтов и комплекса доступных экспедиционных батиметрических измерений, приведенных к узлам 30 секундной градусной сетки, начиная с глубин 200 м. Высокая разрешающая способность изображений СЗ сектора Японского моря определяется синтезом материалов спутниковой альтиметрии и данных батиметрических карт, полученных в ходе детальных эхолотных съемок, проведенных в этом районе Тихоокеанским океанологическим институтом им В.И. Ильичева (ТОИ) Дальневосточного отделения РАН и другими научными, научно-производственными организациями России и Японии. Пространственное разрешение цифровой модели рельефа дна океана GEBCO 2014 составляет 0.5 дуговой минуты или 0.93 км (<http://Ocean3dprojects...>).

Достоверность выделения кольцевых аномалий фототона, соотносимых с проекциями очаговых структур в пределах ПВБ, ПВТ и прилегающих участков абиссальной равнины Центральной котловины, континентального, островного склонов и шельфа подтверждается рядом данных. Это — выдержанность диапазона параметрических характеристик кольцевых аномалий на различных участках дна, расположенных друг от друга на десятки и более км; отчетливая связь аномалий с куполообразными или воронкообразными формами рельефа, имеющих радиально-концентрическую батиметрическую зональность; их упорядоченное, с элементами трансляционной симметрии, размещение в пределах полос выделяемых линеаментов, соотносимых с зонами магмоконтролирующих разломов; наличие принципиально похожих особенностей внутреннего строения кольцевых аномалий, имеющих дуговые, кольцевые и радиальные элементы, концентры и моно- и полядерный, ядерно-сателлитный и орбитально-сателлитный унифици-

цированные типы инфраструктуры, установленные для очаговых систем.

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ВОЗВЫШЕННОСТЕЙ БОГОРОВА, ТОЯМА И ДНА ПРИЛЕГАЮЩИХ РАЙОНОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

В соответствии с имеющейся батиметрической картой дна северо-западной части Японской (Центральной) котловины (Карнаух, Цой, 2010), ПВБ состоит из двух небольших линейных поднятий, разделенных седловиной шириной около 5 км (рис. 1). Эти картографические построения основаны на результатах эхолотных промеров, полученных в 14 рейсах научно-исследовательских судов ТОИ ДВО РАН 1990–2005 гг. При оценке параметров возвышенностей в качестве граничной выбрана изобата 3600 м, которая характеризует максимальные глубины этого района Японского моря. Длина северного хребта, вытянутого в субмеридиональном (отклонение к СВ) направлении, превышает 35 км, ширина варьирует от 17 до 22 км (южный сегмент). Протяженность южного хребта, имеющего меридиональную ориентировку, равна 48 км при средней ширине 22 км. Минимальные глубины на северном хребте составляют 2070 м, на южном — 1300 м. Относительно дна прилегающей абиссальной равнины их высоты укладываются в диапазон 1500–2300 м. По данным глубинного сейсмического зондирования (Карп и др., 2007; Прокудин и др., 2018), земная кора в Центральной котловине и в пределах подводного поднятия относится к океаническому типу. Мощности ее приближается к 8.5 км, с учетом осадочного слоя, составляющего 2 км. По материалам проведенного драгирования выходов акустического фундамента в геологическом строении ПВБ принимают участие базальты, трахиандезиты и трахиты с абсолютными датировками от 18 до 6.5 млн лет. Несмотря на некоторое несоответствие стратиграфической шкале, исследователи (Геология..., 1987; Леликов и др., 2001) относят эти образования к среднемиоцен-плиоценовому комплексу.

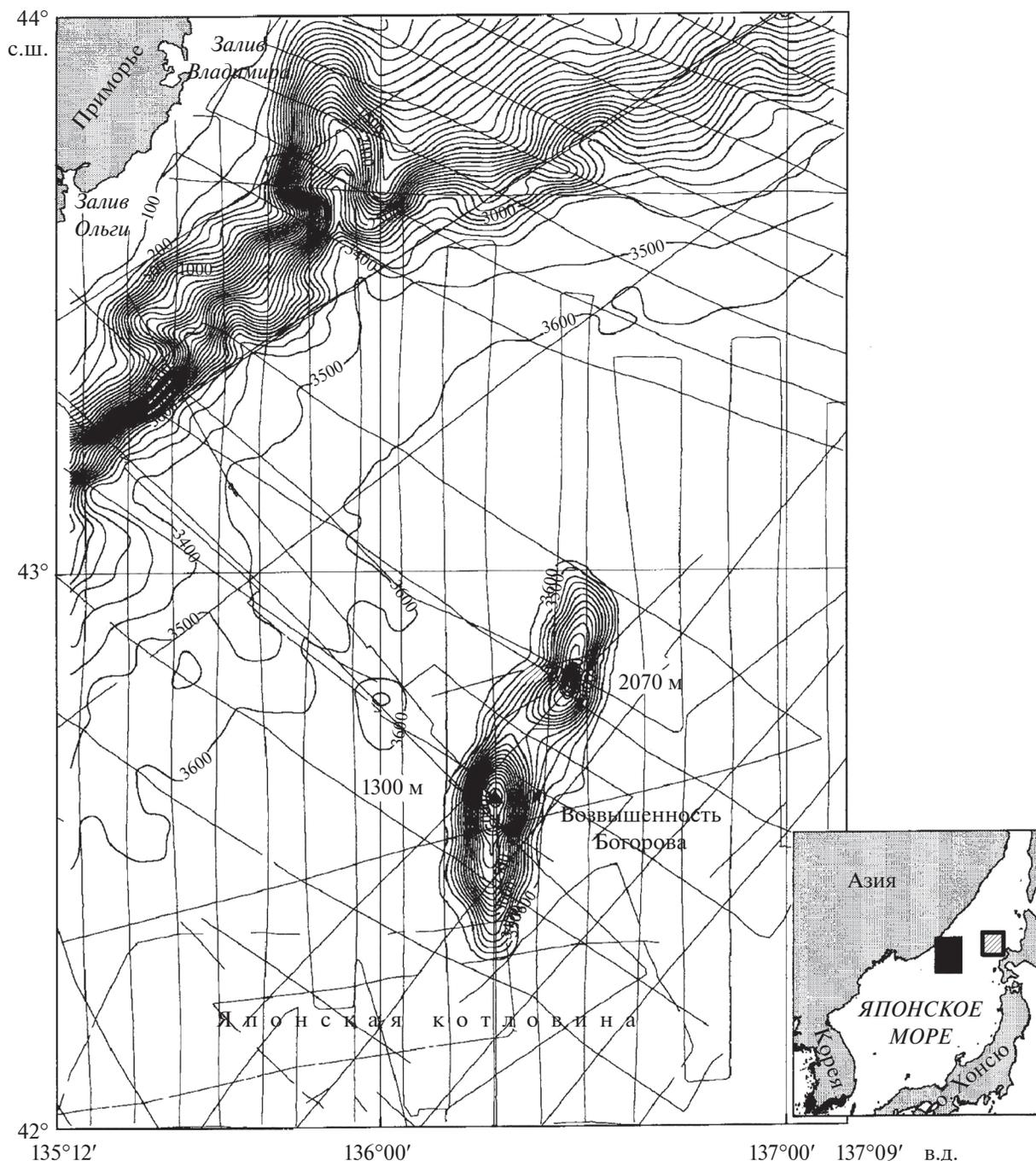
Приведенная схема акустического фундамента показывает наличие вокруг ПВБ серии различных по размерам выступов, которые, видимо, соответствуют погребенным подводным возвышенностям и палеовулканическим структурам (рис. 2). Наиболее крупные поднятия расположены между ПВБ и континентальным склоном, ограничивая с юга Крайнюю депрессию. Более мелкие фиксируются на ее восточных и северных бортах. Высокая (до 40%) пористость базальтов, и наличие пирокластического материала в осадках (Карнаух,

Цой, 2010) указывают на высокую насыщенность магмы летучими компонентами (газы, флюиды) и сочетание эффузивного и взрывного механизмов извержений.

В соответствии с данными сейсмического профилирования, в Центральной котловине Японского моря развиты два структурно-вещественных комплекса осадочного чехла (Карп и др., 2007). Судя по немногочисленным материалам глубоководного бурения (скважины ODP 795, DSDP 301), верхний — сложен диатомовыми илами, пелитовыми и алевритовыми отложениями, содержащими прослойки песчано-алевритовых фракций осадков и вулканических пеллов. Нижний образован аргиллитами среднемиоценового возраста. Роль акустического фундамента играют брекчированные, массивные базальты, андезитобазальты, представляющие собой части покровов и палеовулканических построек. Именно эти породы были вскрыты скважиной ODP 795, которая пробурена на западном склоне подводного хребта Окусири, расположенного на восточном борту Центральной котловины.

Показательно, что в центральных частях глубоководных котловин слои пород осадочного чехла залегают горизонтально. Угловые, стратиграфические несогласия и признаки дислоцированности пород появляются лишь на бортах котловины (Геология..., 1987; Geology..., 1996 и др.). Приведенные далее материалы дешифрирования изображений показывают наличие в центральной части Центральной (Япономорской) котловины лишь небольшого числа кольцевых аномалий, соответствующих с очаговыми структурами, и соответственно почти полное отсутствие признаков позднекайнозойской (плиоцен-плейстоцен) вулканической активности.

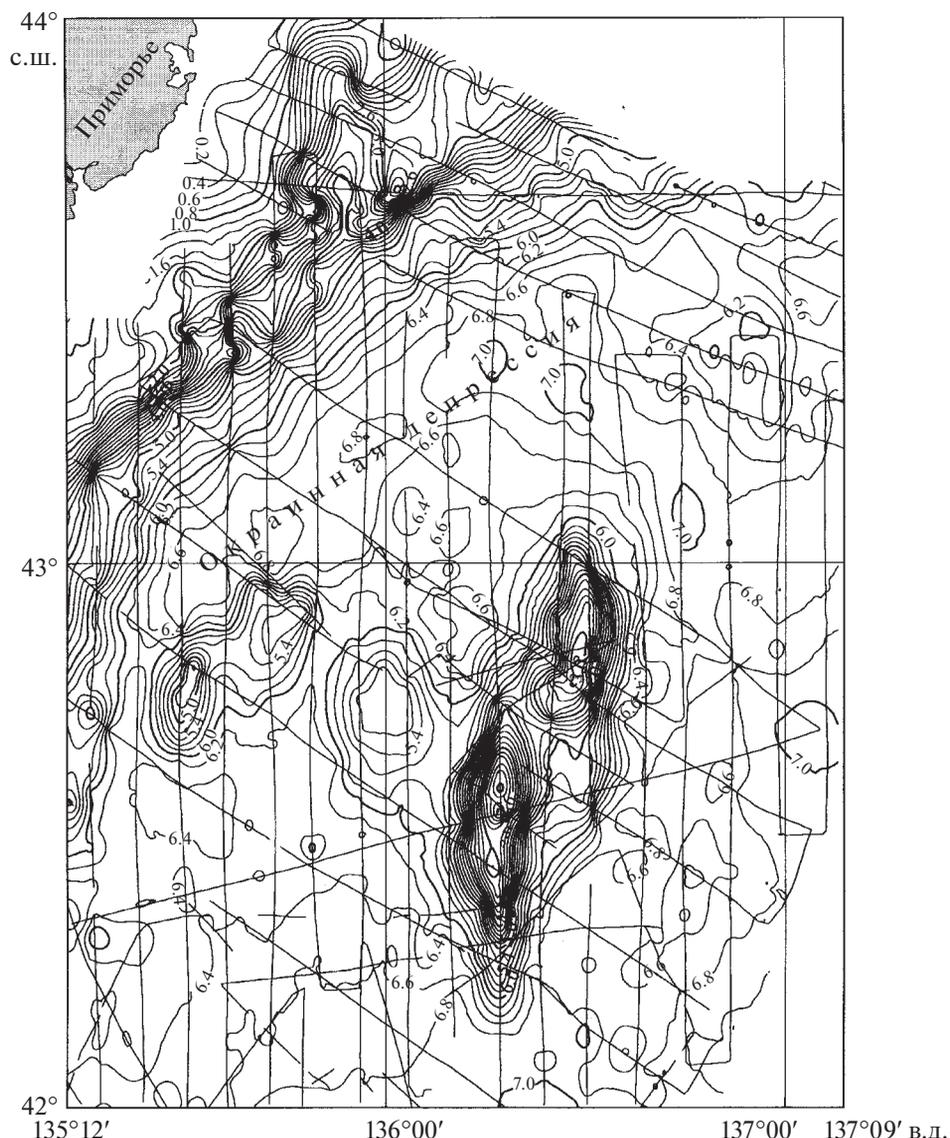
Помимо подводных возвышенностей, в ходе предшествующих исследований (Геология..., 1987; Сигова, 1990) в Центральной котловине, были выявлены отдельные крупные вулканы (Галагана, Кольцо и др.) диаметром 20–30 км, но число их невелико. Крупные скопления кольцевых форм рельефа и связанных с ними очаговых систем фиксируется лишь к северо-востоку от ПВБ в районе ПВТ и подводного хребта Окусири. Характеризуясь океаническим типом земной коры (Карп и др., 2007; Прокудин и др. 2018), ПВТ расположена на расстоянии около 150 км от северо-западного побережья о. Хоккайдо и представляет собой группу палеовулканов, образующих систему купольных поднятий и прилегающих плато. Грabenами широтной и северо-восточной ориентировки поднятие разделено на два относительно крупных блока (западный и восточный), границы которых определяются сериями пересекающихся широтных, меридиональных и северо-восточных разломов. В отличие от ПВБ геологических и гео-



**Рис. 1.** Батиметрическая карта района расположения подводной возвышенности Богорова и прилегающих участков дна Центральной (Японской) котловины. Тонкие линии – профили эхолотных промеров. Черные треугольники – вершины возвышенностей, цифры рядом – значения глубин над вершинами (Карнаух, Цой, 2010). На врезке прямоугольниками показана позиция районов более детальных исследований на мелкомасштабной схеме: черным цветом – подводной возвышенностью Богорова, серым – с подводной возвышенностью Тояма.

физических данных о строении ПВТ немного. По результатам драгирования (Геология..., 1987; Geology..., 1996), основу этого поднятия образуют породы среднемиоцен-плиоценового трахибазальтового комплекса, состоящего из трахибазальтов, базальтов, трахиандезитов, трахитов.

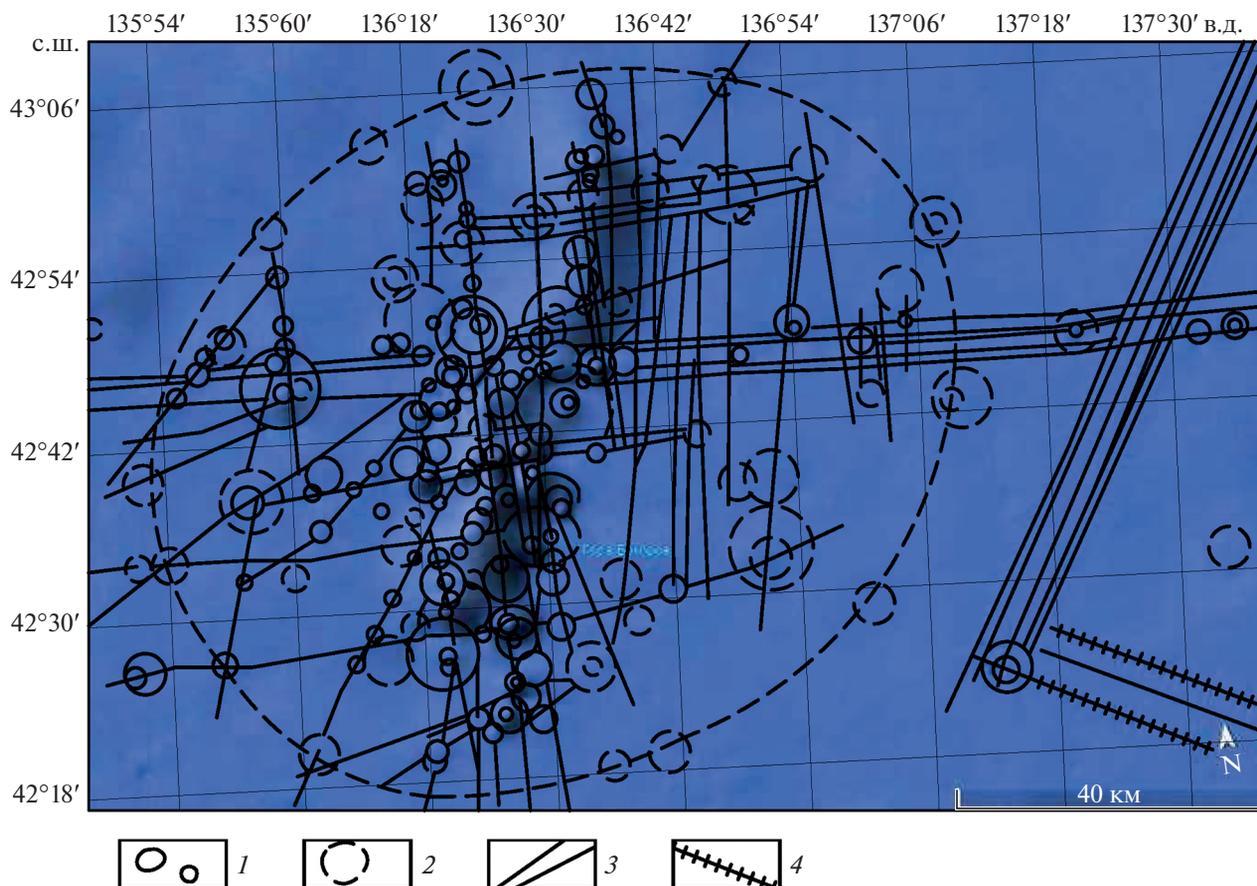
Восточнее находится подводный хребт Окусири, удаленный от берегов о. Хоккайдо на расстояние 90–100 км (см. рис. 4) и имеющий меридиональную ориентировку. Вместе с подводными поднятиями Ребуно-Монеронским и Каман-Мусаси, он определяет главные особенности морфо-



**Рис. 2** Карта поверхности акустического фундамента района расположения подводной возвышенности Богорова. Изогипсы проведены через 0.2 с. Тонкие линии – сейсмические профили (Карнаух, Цой, 2010).

логии рельефа и строения островного склона Хоккайдо. Отдельную группу положительных морфоструктур в хребте Окусири образуют подводные поднятия Сякотан и Ширибеши (Сигова, 1990). Драгированные в его пределах прибрежно-морские олигоценовые терригенные отложения указывают на наличие в этот исторический период небольших островов, связанных с вершинами вулканического хребта. Его образование – следствие масштабного накопления значительных объемов эффузивного материала в зоне глубинного разлома на борту Центральной котловины. При ее дальнейшем опускании в среднем-позднем миоцене хребет оказался ниже уровня моря. Главная роль в строении этого линейного поднятия отводится неогеновой осадочно-вулканоген-

ной толще и щелочным оливиновым базальтам, трахибазальтам, реже трахиандезитам. В основании разреза здесь выделяют туфогенно-терригенные образования (аргиллиты, туфы, конгломераты). Выше залегают алевролиты, туфодиациты, туфоаргиллиты, диатомовые глины, песчаники, туфогенные (пепловые) глины. В позднем миоцене появляются диатомовые глины, диатомиты, глины. Породы плиоценового возраста не установлены (Геология..., 1987). По другим данным (Geology..., 1996), в основании разреза залегают также позднеолигоценовые базальтоиды. Результаты геофизических работ показывают, что это подводное вулканическое сооружение отличается континентальным типом земной коры мощностью 15–20 км (Прокудин и др., 2018).

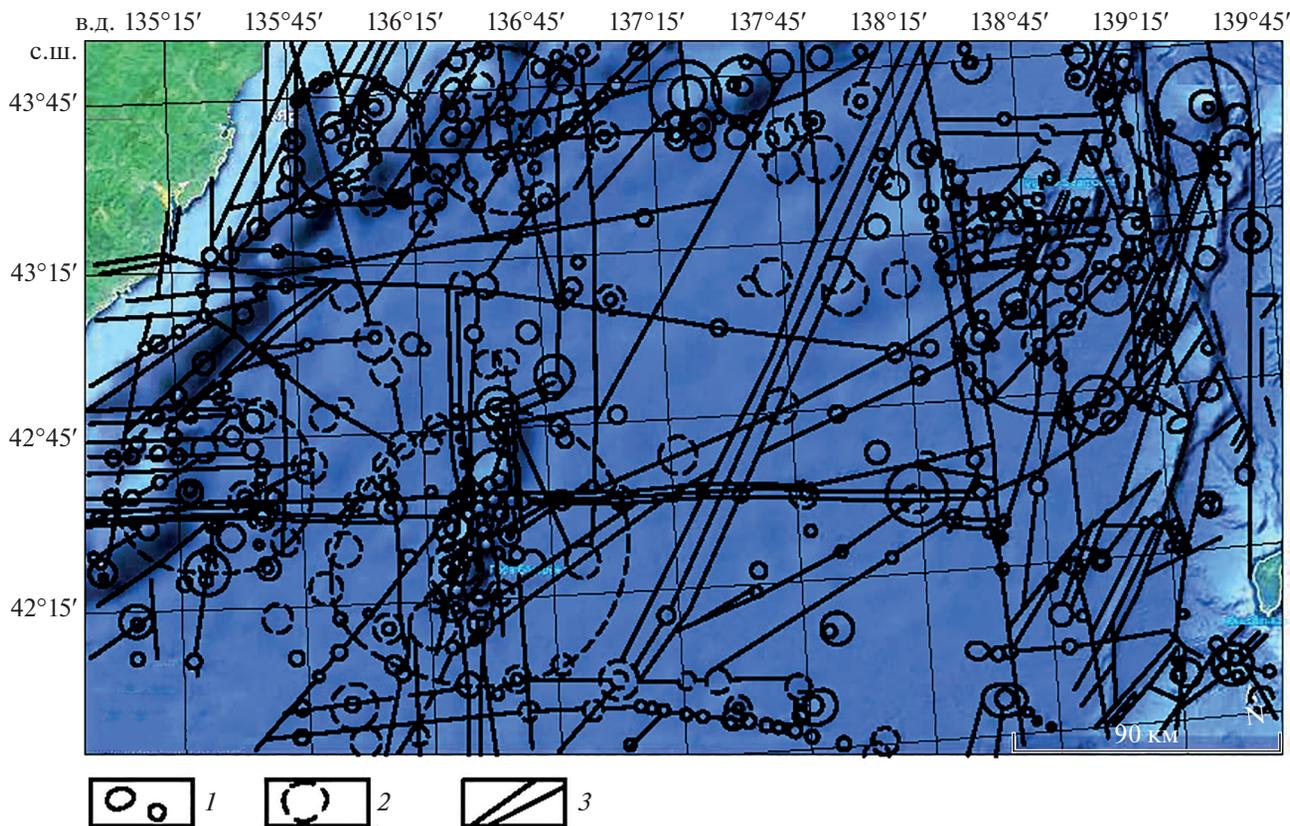


**Рис. 3.** Схема размещения кольцевых аномалий, соотносимых с палеовулканоструктурами соответствующего ранга, и систем линеаментов, связанных с разрывными нарушениями, в пределах ПВБ и прилегающих участков дна Центральной котловины. Составлена по данным космогеологического дешифрирования объемного изображения цифрового рельефа (GEBCO 2014) в рамках программы Google Earth. 1–2 – Кольцевые аномалии, соотносимые с проекциями очаговых систем разного ранга: 1 – выраженные отчетливо, 2 – проявленные менее контрастно; 3–4 – линеаменты, соотносимые с зонами разломов: 3 – характеризующиеся относительно простым строением, 4 – отличающиеся наличием поперечных структурных элементов.

На современном уровне геоморфологических и геолого-геофизических исследований в некоторых работах (Карнух, Цой, 2010; Прокудин и др., 2018 и др.) подводные возвышенности дна Центральной котловины напрямую отождествляются с вулканическими структурами. К ним относят короткие хребты, одиночные и сложно построенные горы вулканического происхождения. Очевидно, что такой подход не всегда оправдан. Существуют не только прямые, но и более сложные связи, отношения форм рельефа и геологических структур, когда тектоническую основу неровностей поверхности литосферы образуют системы структурных элементов разного возраста и генезиса. Особенно это характерно для горных сооружений суши, представляющих, как правило, полигенные и гетерохронные образования (Гаврилов, 2017). Но даже для генетических однородных вулканогенных хребтов суши (Камчатка), островных дуг (Курилы) и дна морей, океанов (Гавайи)

и возраст и строение слагающих их построек могут быть различны, что существенно влияет на интерпретацию геоморфологических и геологических данных, решение вопросов о происхождении и развитии объектов исследования. Сходные закономерности отмечаются и для подводных возвышенностей и хребтов дна Центральной котловины Японского моря, которые, как будет показано далее, представляют собой системы различных дислокаций (ряды палеовулканических структур, разломы, блоки).

В целом, как показывает анализ имеющихся материалов, несмотря на большой объем батиметрических, геологических и геофизических работ, проведенных в 14 рейсах ТОИ ДВО РАН и в экспедициях других научно-исследовательских организаций, конкретные типы структурных элементов, детали геоморфологического и геологического строения ПВБ, ПВД и подводного хребта



**Рис. 4.** Схема размещения кольцевых аномалий, соотносимых с проекциями палеовулканических центров, мантийных диапиров, и линеаментов, сопоставляемых с зонами разломов, северной части Центральной котловины Японского моря. Составлена по данным дешифрирования объемного изображения цифрового рельефа (GEBCO 2014) в рамках программы Google Earth. Условные обозначения см. рис. 3.

Окусири были установлены лишь частично. Оставались неизвестными количество, строение и характер размещения палеовулканических структур, их морфология, параметры, связь с разрывными нарушениями. Не были получены данные о пространственной и иерархической организации разломов, очаговых систем, блоковых дислокаций. Решение этих задач связано с новыми техническими возможностями и методами получения информации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При космогеологическом дешифрировании визуализированной (3D) цифровой модели подводного рельефа ПВБ, ПВТ и прилегающих площадей, которые представлены в программе Google Earth, получен ряд принципиально новых данных.

1. Впервые выявлен крупный широтной разлом, который разделяет линейное поднятие ПВБ на северный и южный блоки. Он состоит из серии субпараллельных разрывных нарушений и представляет собой единую зону дислокаций шириной более 5 км, которая проходит через всю Цен-

тральную котловину и протягивается далее на запад до бровки шельфа, но не прослеживается в пределах континента (рис. 3).

2. В пределах ПВБ и прилегающих площадей выделена сложная пространственная система кольцевых морфоструктур разного строения и размера, которые соотносимы с проекциями вулканических построек. Диаметр самых крупных оценивается в 11–12 км, мелких – 2.5–3 км. Наиболее широко распространены палеовулканические постройки, составляющие в поперечнике 5–6 км. Согласно полученным данным, тектоническая основа хребтов ПВБ образована рядами мелких и средних по размеру моногенных и полигенных (имеющих сателлиты) палеовулканов с центральными куполами (лавовые, экструзивные?), которые концентрируются в зонах двух субпараллельных меридиональных магмоконтролирующих разломов.

3. Вокруг ПВБ группируются как мелкие, так и относительно крупные (диаметр до 12 км) вулкано-структуры, положение которых контролируется разрывными нарушениями меридионального, широтного, северо-восточного простирания, а

также узлами их пересечений. Аномально высокая концентрация вулканических центров разных размеров и их круговая пространственная организация позволяют наметить контуры более крупной очаговой системы диаметром около 100 км, которая может быть сопряжена с проекцией мантийного диапира. Структурная позиция этого глубинного центра эндогенной активности определяется приуроченностью к узлу пересечения широтной региональной зоны разрывных нарушений серий меридиональных и северо-восточных разломов, что обуславливает повышенную проницаемость данного участка земной коры. При этом хребты ПВБ образуют диаметральные структурные элементы выделяемой мантийной очаговой системы. Зона крупного широтного разлома разделяет ее на северный и южный диаметральные блоки, развивающиеся дифференцированно. Это объясняет различия максимальных высот соответствующих сегментов хребта Богорова и плотности палеовулканических построек в их пределах.

4. Связь ПВБ с глубинным энерго- и магмогенерирующим центром позволяет предполагать длительный характер ее развития и участие в ее строении разных возрастных группировок вулканических структур Япономорской впадины: поздний олигоцен-ранний миоцен (23–17 млн лет), средний-поздний миоцен- (14–10 млн лет) и плиоцен-плейстоцен (5.3–1.0 млн лет), – не исключая и более древние, эоценовые образования. Возможно, что именно этими факторами обусловлено нахождение на ПВБ щелочных трахиандезитов, трахитов, трахидацитов и трахириолитов (трахиандезитовый комплекс) (Геология, 1987). Установленные особенности строения и предполагаемая длительность развития ПВБ повышают, по мнению автора, перспективы обнаружения в ее пределах проявлений рудной минерализации.

5. Похожие по размерам (диаметр до 65 км) концентрические группировки кольцевых аномалий и связанных с ними палеовулканов выделяются к западу и к северу от ПВБ (рис. 4). Расположены они на стыке материкового склона и абиссальной равнины, в узлах пресечений глубинных разломов широтного и северо-восточного простираний, выполняющих роль структурных границ окраины континента и борта Япономорской впадины (Гаврилов, 2009). По особенностям внутреннего строения их инфраструктуры относятся к полядерно-сателлитному и орбитально-сателлитному типам.

6. Такая же как в ПВБ аномально высокая концентрация кольцевых аномалий, соотносимых с проекциями палеовулканических центров, отмечается не только в пределах континентального, но и на островном склоне в районе подводного хребта Окусири и ПВТ. Ее структурная позиция

определяется приуроченностью к узлу пересечений серий широтных, меридиональных и северо-восточных разломов. Структурный контроль положения и простирания подводного хребта Окусири осуществляется меридиональным трансрегиональным глубинным разломом. Как видно на приведенной схеме (см. рис. 4), один из сегментов этого хребта, пересекаемый группой разрывных нарушений северо-восточного простирания отличается аномально высокой плотностью кольцевых морфоструктур. Совокупность полученных данных о высокой плотности палеовулканических структур и протяженных линейных индикаторов крупных разломов – свидетельствует о повышенной степени раздробленности и соответственно проницаемости этого участка земной коры. Как показывают проведенные исследования в районе ПВБ, подобные структурные ситуации благоприятны для образования инъективных дислокаций литосферной мантии. Кольцевое расположение многих палеовулканических построек и рисунок разломов позволяют предположить наличие здесь глубинной очаговой структуры с диаметром проекции около 80 км.

7. Несмотря на то, что подводный хребет Окусири, характеризуется континентальным типом земной коры, можно предполагать влияние мантийного диапира на формировании как вулканических систем ПВТ, так и прилегающего сегмента хребта, который резко отличается от других участков этого подводного горного сооружения. Специфика их строения заключается в том, что в пределах ПВТ доминируют широтные, северо-восточные и меридиональные зоны разломов, а для хребта Окусири основные магмоконтролирующие разрывные нарушения имеют меридиональное и северо-восточное простирание. Об этом, в частности, свидетельствуют две крупные цепи вулканических структур, проходящих через кольцевую аномалию, соотносимую с проекцией мантийного диапира (см. рис. 4). В соответствии с полученными данными, подводный хребет Окусири представляет собой цепь вулканических построек на островном склоне, сформированных в зоне граничного магмоконтролирующего разлома. Его раскрытие и высокая активность обусловлены дифференцированным и контрастным развитием Центральной котловины и островной дуги, что создает предпосылки для формирования сбросовых и сбросо-сдвиговых дислокаций. При таких особенностях строения хребта и отсутствии следов спрединга в котловине оценивать это подводное горное сооружение как продукт коллизионных процессов тектогенеза и элемент зоны конвергенции восточного участка дна Японского моря (Tamaiki, 1988) вряд ли целесообразно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные параметрические характеристики очаговых морфоструктур и анализ их пространственных соотношений позволяют выделить по меньшей мере два ранга объектов, имеющих различные глубины заложения. Аномальная концентрация и размещение групп относительно небольших палеовулканов в пределах узлов пересечений крупных разрывных нарушений дают основание идентифицировать крупные кольцевые аномалии с проекциями мантийных диапиров и предположить относительно длительный характер их развития с возможностью реализации процессов рудообразования. Наблюдаемое подобие геометрии и строения крупных и мелких кольцевых аномалий согласуется с ранее полученными данными о конвергентном развитии и гомологии очаговых структур (Гаврилов, 1990). Устойчивость концентрического рисунка группировок палеовулканических построек и соответственно магмоподводящих каналов над мантийными диапирами — свидетельство отсутствия в пределах рассматриваемых участков дна значительных по амплитуде горизонтальных тектонических движений.

В зависимости от степени проницаемости земной коры роль глубинных очаговых систем в развитии рельефа морского дна меняется. В закрытых системах мантийный материал не достигает поверхности, осуществляя работу по магматической базификации, термическому, структурно-вещественному уплотнению земной коры. О таком механизме погружения окраины континента свидетельствуют как характер выявленных гравитационных аномалий, так и относительно высокий тепловой поток в глубоководных котловинах Япономорской впадины (Geology..., 1996; Карп и др., 2007). При относительно высокой проницаемости земной коры в зонах разломов, испытывающих растяжения, и в узлах их пересечения за счет эффекта декомпрессии масштабно реализуются флюидные и магматические процессы, приводящие к возникновению многочисленных вулканических структур и их концентрических или линейных группировок. Отмечаемая многими исследователями (Съедин, 1989; Карнаух, Цой, 2010 и др.) высокая пористость (до 40% объема породы) базальтов палеовулканических построек — признак значительной газо-флюидонасыщенности исходной магмы и декомпрессионных явлений при извержениях.

На представленных изображениях подводного рельефа дешифрируются различные пространственные и иерархические системы разломов. Среди них доминируют структуры широтной, меридиональной и северо-восточной ориентировки. Наиболее крупные из линеаментов и соответ-

ственно зон разломов протягиваются на первые сотни км. Представлены они системами более мелких линеаментов-разрывов, образующих полосы шириной 5–10 км. Многие разломы контролируют цепи палеовулканоструктур центрального типа с отчетливо выраженной трансляционной симметрией. Отмечается общая устойчивость протираний крупных зон разломов и цепей вулканических структур без видимых признаков их смещений. В узлах пересечения разрывных нарушений разных направлений для отдельных структур выражен эффект “утыкания”, резкого ограничения, следы изменения их простираций многочисленны.

Установленные общие особенности размещения и концентрации вулканических построек дна северо-западной части Японского моря отражают совмещение черт трещинного и центрального типов извержений базальтовой лавы. Это типично для районов многовыходного типа базальтового вулканизма, проявляющегося при неглубоком расположении выступов астеносферы, или мантийных диапиров, когда над ними возникают области своеобразного “вскипания” базальтоидной магмы. Формирование подводных возвышенностей, рассматриваемых автором в качестве индикаторов тектономагматических процессов, обусловлено прорывом магматического материала к поверхности и его концентрацией в пределах участков земной коры, отличающихся повышенной проницаемостью. С учетом высокой подвижности базальтовых лав важная роль в строении подводных возвышенностей, вероятно, принадлежит экструзивным и интрузивным (на более глубоких уровнях) образованиям. При больших масштабах извержений и меньших амплитудах опускания Центральной котловины на их месте были бы сформированы вулканические острова. Количество, параметры, дискретное размещение и строение возникших вулканических положительных морфоструктур свидетельствуют о том, что раздвиги и зоны синсдвигового растяжения (механизм pull-apart) имели при развитии котловины ограниченное распространение, отражая относительно пассивное протекание процессов рифтогенеза и доминирование процессов очаговой геодинамики. Как свидетельствуют ранее полученные данные (Геология..., 1987; Гаврилов, 2020, 2021) и приведенные материалы, определяющая роль в формировании и развитии Центральной котловины и Япономорской впадины в целом принадлежит явлениям мантийного диапиризма и базальтоидного ареального вулканизма.

Хорошо известно, что существуют два основных типа вулканических построек или структур. В морфологическом аспекте это — образования линейного и центрального типа. В генетическом — постройки, связанные с протяженными магмоконтролирующими разломами, трещинами,

возникающими при расколах земной коры, и сооружения, образующиеся при наличии магматических очагов, центров и исходящих из них подводных каналов. При трещинных излияниях образуются лавовые поля, лавовые, экструзивные валы, линейные (трещинные) магматические тела, взрывные рвы. Морфология вулканов центрального типа в многом зависит от состава, вязкости и газонасыщенности магмы. Однако, при всем многообразии их разновидностей (моногенные, полигенные, щитовые, стратовулканы, шлаковые конусы и др.) и различиях типов извержений (гавайский, пелейский, фреатический, подводный и др.) в условиях относительной изотропности геологической среды формируются гравитационно устойчивые формы (купола, конусы, усеченные конусы и др.) с симметрией центрального типа, отличающиеся радиально-концентрической организацией дислокаций, геологических тел и соответствующей гипсометрической и геологической зональностью.

Относительная ограниченность структурно-геометрических типов магматических систем обусловлена реализацией двух принципиально возможных способов передачи энергии в пространстве – объемного и канального. В изотропной и слабо анизотропной геологической среде существует равная вероятность всех направлений перемещений потоков тепломассопереноса от “горячих точек”, энергогенерирующих центров недр (плюмы, мантийные диапиры, магматические очаги и др.), обладающих необходимым потенциалом. Форма их теплового поля и поля термомеханических напряжений варьирует от сфероида до эллипсоида, а схемы организации силовых линий и потоков тепломассопереноса имеют радиально-концентрическую симметрию, что соответствует объемному или поливекторному способу передачи энергии. Проекция таких центров и магматических каналов (цилиндры, конусы, купола) на поверхность Земли образуют кольцевые структуры, или структуры центрального типа. В резко анизотропной среде переток энергии из одной точки пространства в другую, при наличии достаточной разности потенциала, осуществляется кумулятивно, канальным (моновекторным) способом (рифты, разломы и др.). Промежуточный тип состоит из цепей, рядов вулканических структур центрального типа, формирующих с магмоконтролирующими разломами единые геодинамические системы (Гаврилов, 1990, 2017). В зависимости от степени анизотропии геологической среды и мощности, длительности существования, характера распределения магматических потоков в пространстве (объемного или канального) формируются то вулкано-генные хребты, то подводные возвышенности, то отдельные вулканы с соответствующей морфоло-

гией и энергетически обусловленными параметрическими характеристиками.

В основе образования вулкано-генных поднятий в пределах впадин окраинных морей лежит относительно перекомпенсированное накопление магматического материала, происходящее на фоне опускания дна акватории. Поскольку его объем определяется масштабом и длительностью функционирования магматических центров, максимально благоприятные условия для подводного горообразования возникают при наличии глубоководных энерго- и магмогенерирующих систем. Для протяженных подводных хребтов это магмоподводящие каналы, соотносимые с глубинными разломами, а для изометричных поднятий и относительно коротких хребтов эту роль играют выступы литосферной мантии, или мантийные диапиры. Исходя из принципа минимизации затрат энергии, конвергентности очаговых процессов (Гаврилов, 2017) и концентрического строения крупных группировок выявленных палеовулканических построек (см. рис. 4), можно предполагать, что мантийные диапиры имеют лакколитообразную, купольную форму с симметрией центрального типа.

С этих позиций очевидно, что вулкано-генные поднятия в пределах дна Японского моря следует рассматривать как сложные комплексы палеовулканических структур рассмотренных морфологических типов. отождествление, определение степени конформности вулкано-генных форм рельефа и структур требуют специальных исследований. Имеющиеся данные определения возраста магматических пород впадины Японского моря (Геология..., 1987; Съедин, 1989; Geology..., 1996; Леликов и др., 2001; Леликов, Емельянова, 2007) позволяют предполагать наличие трех главных возрастных группировок палеовулканических структур: поздний олигоцен-ранний миоцен (23–17 млн лет), средний-поздний миоцен- (14–10 млн лет) и плиоцен-плейстоцен (5.3–1.0 млн лет). Среди драгированных на подводных поднятиях вулканических пород базальты составляют около 90% объема поднятого материала, что предполагает доминирование эффузивного характера извержений. Значительно реже встречаются щелочные трахиандезиты, трахиты, трахидацилы и трахириолиты, установленные, в частности, на ПВБ и подводном хребте Окусири (Geology..., 1996; Прокудин и др., 2018).

Образование Прибрежного позднекайнозойского вулкано-генного пояса в западной части grabena Татарского пролива, пояса “зеленых туфов” на западных окраинах Японских островов и хребта Окусири – следствие дифференцированного, контрастного развития глубоководных котловин Япономорской впадины и окружающей континентальной и островной суши. Вследствие разли-

чий амплитуд и направленности тектонических движений возникли геодинамические условия для раскрытия и активного функционирования ограничивающих впадину магмоконтролирующих разломов (Гаврилов, 2009).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение 3 D моделей цифрового рельефа, создаваемых на основе глобальной базы батиметрических данных и методик GEBCO 2014 в рамках программы Google Earth, позволило получить принципиально новую информацию о качественных и количественных характеристиках структурных элементов подводных возвышенностей Богорова, Тояма и прилегающих участках дна Центральной котловины Японского моря. В соответствии с полученными данными, исследуемые подводные возвышенности представляют собой сложные комплексы палеовулканических построек центрального типа, образующих с разрывными нарушениями и узлами их пересечений единые тектономагматические системы. Установлены параметры, морфологические характеристики, закономерности размещения палеовулканических структур, выделены два ранга очаговых систем и линеаментов. Области повышенной плотности разрывных нарушений и группировок палеовулканических форм, узлы пересечений крупных разломов рассматриваются как участки повышенной проницаемости земной коры. С ними связаны проекции глубинных очаговых систем, соотносимых с выступами литосферной мантии. Выдержанность простираний цепей палеовулканических построек, устойчивость концентрического рисунка их пространственной организации в пределах крупных очаговых систем и отсутствие признаков существенных смещений разрывных нарушений различных направлений в узлах пересечений указывают на относительно небольшие амплитуды горизонтальных перемещений тектонических масс. Наиболее вероятные причины масштабного и относительно быстрого опускания Центральной котловины – активная дефлюидизация литосферной мантии, базальтовый аркальный вулканизм и интрузивные, протрузивные инъективные дислокации базитового и ультрабазитового мантийного материала, предопрелившие структурно-вещественные преобразования земной коры региона на позднекайнозойском этапе ее развития.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Пространственно-временные изменения геофизических полей, их связь со структурой, геодинамикой и сейсотектоническими процессами в литосфере дальневосточных морей России и их обрамлении»

(0271-2016-0003). Регистрационный номер: АААА-А17-117030110032-3.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилов А.А.* О структурно-геометрической типизации и гомологии геологических систем центрального типа // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1990. № 12. С. 89–96.
- Гаврилов А.А.* Роль разрывных нарушений в формировании береговых линий Охотского и Японского морей. Ст. 1. Региональный аспект исследований // Геоморфология. 2009. № 3. С. 38–48.
- Гаврилов А.А.* Морфотектоника окраинно-континентальных орогенных областей (Юг Дальнего Востока и прилегающие территории). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 311 с.
- Гаврилов А.А.* Структурные элементы впадины Японского моря и прилегающей островной и континентальной суши по данным космогеологических исследований // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 27–40.
- Гаврилов А.А.* Космогеологическая индикация морфо-структурных элементов побережий и дна прилегающих акваторий (зал Петра Великого, Японское море // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 633–648. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040043>
- Геология дна Японского моря. Владивосток / *Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Г., Терехов Е.П., Цой И.Б.* ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с
- Карнаух В.Н., Цой И.Б.* Сейсмическая стратиграфия и условия формирования осадочного чехла Японского моря в районе возвышенности Богорова // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 590–607.
- Карп Б.Я., Прокудин В.Г., Медведев С.Н., Карнаух В.Н.* Строение земной коры по сейсмическим данным (Японское море). Дальневосточные моря России. Кн. 3. Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 26–47.
- Кольцевые структуры континентов Земли / *В.Н. Брюханов, В.А. Буш, М.З. Глуховский, Зверев А.Т., Кац Я.Г., Макарова Н.В., Сулиди-Кондратьев Е.Д.* М.: Недра, 1987. 184 с.
- Космическая информация в геологии. М.: Наука, 1983. 534 с.
- Лебедев С.А.* Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 33–49.
- Леликов Е.П., Емельянова Т.А.* Японское море. Геологическое строение (новые данные). Дальневосточные моря России. Кн. 3. Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 86–98.
- Леликов Е.П., Емельянова Т.А., Съедин В.Т. и др.* Новые данные по радиоизотопному датированию вулканитов Японского и Охотского морей // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 5. С. 118–122.
- Прокудин В.Г., Съедин В.Т., Валитов М.Г., Медведев С.Н.* Центральная котловина Японского моря: история изучения и тектоника // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 4. Вып. 40. С. 82–104.

Сигова К.И. Соотношение поверхностных и глубинных структур земной коры впадины Японского моря. Владивосток. ТОИ ДВО РАН. 1990. 112 с.

Съедин В.Т. Особенности кайнозойского базальтоидного магматизма и вопросы происхождения Японского моря // Тихоокеанская геология. 1989. № 2. С. 30–38.

*Geology and Geophysics of the Japan Sea* (Japan-USSR Monograph. Series. V. 1) / Edited by N. Isezaki, I.I. Bersenev Tokyo: TERRA PUB, 1996. 487 p.

Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № B11. P. 21803–21824. <https://doi.org/10.1029/94SB00988>

Tamaki K. Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implication // *Bull. Geol. Surv. Japan.* 1988. V. 39 (5). P. 269–365. <http://ocean3dprojects.org/oceans-bathymetry...gebco-2014/...>

## New Data on the Structure of Bogorov, Toyama Underwater Rises and Adjacent Areas of the Sea of Japan Bottom (Based on the Results of Geomorphological and Cosmogeological Investigations)

A. A. Gavrilo

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

The data about qualitative and quantitative characteristics of the Bogorov, Toyama underwater Rises morphostructural elements and adjacent areas of the Sea of Japan Central basin bottom were first obtained by the use of 3 D models of digital relief, created on the basis of the global bathymetric data bank and GEBCO methods under the Google Earth program. It was established that the investigated Rises are complexes of paleovolcanic structures of the central type, forming with fracture zones and junctions of their intersections united tectonomagmatic systems. Parameters, morphological characteristics, peculiarities of internal structure (types of infrastructures) of paleovolcanic objects are determined, spatial and hierarchical (two object ranks) systems of faults and focal formations are revealed. Concentric groupings of paleovolcanoes are identified with projections of mantle diapirs. The obtained information allows us to evaluate from new positions the adequacy of the existing models of formation and development of the Sea of Japan continental margin basin.

*Keywords:* Sea of Japan, underwater rise, volcanostructure, lineament, fault, focal system, relief, digital model, morphostructure

### REFERENCES

Gavrilo A.A. O strukturno-geometricheskoy tipizacii i gomologii geologicheskikh sistem central'nogo tipa [On structural-geometric typification and homology of central type geological systems] // *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geologiya.* 1990. № 12. P. 89–96. (In Russian)

Gavrilo A.A. Rol' razryvnykh narushenij v formirovanii bergovykh linij Ohotskogo i Yaponskogo morej. St. 1. Regional'nyj aspekt issledovanij [The role of faults in the formation of Okhotsk and Japan Seas coastlines. St. 1. Regional aspect of research] // *Geomorfologiya.* 2009. № 3. P. 38–48. (In Russian)

Gavrilo A.A. Morfotektonika okrainno-kontinental'nykh orogennykh oblastej (YUg Dal'nego Vostoka i prilgayushchie territorii) [Morphotectonics of marginal-continental orogenic areas (Far East South part of Russia and junction territories)]. Vladivostok: TOI DVO RAN, 2017. 312 p. (In Russian)

Gavrilo A.A. Strukturnye elementy vpadiny Yaponskogo morya i prilgayushchej ostrovnnoj i kontinental'noj sushi po dannym kosmogeologicheskikh issledovanij [Structural elements of the Sea of Japan basin and the adjacent island and continental land according to cosmogeological research] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2020. № 4. P. 27–40. (In Russian)

Gavrilo A.A. Kosmogeologicheskaya indikaciya morfosrukturnykh elementov poberezhij i dna prilgayushchih ak-

vatorij (zal. Petra Velikogo, Yaponskoe more [Cosmogeological indication of coast morphostructural elements and the bottom of adjacent water areas (Peter the Great Bay, Sea of Japan)] // *Okeanologiya.* 2021. T. 61. № 4. P. 633–648. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0030157421040043>

Geologiya dna Yaponskogo morya [Geology of the Sea of Japan bottom]. Vladivostok. Vladivostok / Bersenev I.I., Lelikov E.P., Bezverhnyj V.L., Vashchenkova N.G., S'edin V.G., Terekhov E.P., Tsoj I.B. DVNTS AN SSSR, 1987. 140 p. (In Russian)

Karnauh V.N., Tsoj I.B. Sejsmicheskaya stratigrafiya i usloviya formirovaniya osadochnogo chekhla YAponskogo morya v rajone vozvyshehnosti Bogorova [Seismic stratigraphy and conditions of the sedimentary cover formation of the Sea of Japan in the district of the Bogorov Rise] // *Okeanologiya.* 2010. T. 50. № 4. P. 590–607. (In Russian)

Karp B.YA., Prokudin V.G., Medvedev S.N., Karnauh V.N. Stroenie zemnoj kory po sejsmicheskim dannym (Yaponskoe more) [The Earth's crust structure according to seismic data (Sea of Japan)]. Dal'nevostochnye morya Rossii. Kn. 3. Geologicheskije i geofizicheskie issledovaniya Moscow: Nauka, 2007. P. 26–47. (In Russian)

Kol'cevye struktury kontinentov Zemli [Ring structures of the Earth's continents] / V.N. Bryuhanov, V.A. Bush, M.Z. Gluhovskij, Zverev A.T., Kats YA.G., Makarova N.V., Sulidi-Kondrat'ev E.D. Moscow: Nedra, 1987. 184 p. (In Russian)

- Kosmicheskaya informatsiya v geologii [Space information in geology]. Moscow: Nauka, 1983. 534 p. (In Russian)
- Lebedev S.A.* Sputnikovaya al'timetriya v naukah o Zemle [Satellite altimetry in the Earth Sciences // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 3. P. 33–49. (In Russian)
- Lelikov E.P., Emel'yanova T.A.* YAponское more. Geologicheskoe stroenie (novye dannye) [The Sea of Japan. Geological structure (new data)]. Dal'nevostochnye morya Rossii. Kn. 3. Geologicheskie i geofizicheskie issledovaniya. Moscow: Nauka, 2007. P. 86–98. (In Russian)
- Lelikov E.P., Emel'yanova T.A., S'edin V.T. i dr.* Novye dannye po radioizotopnomu datirovaniyu vulkanitov YAponского i Ohotskogo morej [New data on radioisotope dating of Seas of Japan and Okhotsk volcanites] // Tihookeanskaya geologiya. 2001. T. 20. № 5. P. 118–122. (In Russian)
- Prokudin V.G., S'edin V.T., Valitov M.G., Medvedev S.N.* Central'naya kotlovina YAponского morya: istoriya izucheniya i tektonika [Central basin of the Sea of Japan: history of study and tectonics] // Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle. 2018. № 4. V. 40. P. 82–104. (In Russian)
- Sigova K.I.* Sootnoshenie poverhnostnyh i glubinyh struktur zemnoj kory vpadiny YAponского morya [Ratio of surface and deep structures of the Earth's crust of the Sea of Japan basin]. Vladivostok: TOI DVO RAN, 1990. 112 p. (In Russian)
- S'edin V.T.* Osobennosti kajnozojskogo bazal'toidnogo magmatizma i voprosy proiskhozhdeniya YAponского morya [Features of cenozoic basaltoid magmatism and questions of the Sea of Japan origin // Tihookeanskaya geologiya. 1989. № 2. P. 30–38. (In Russian)
- Geology and Geophysics of the Japan Sea (Japan-USSR Monograph. Series. V. 1) / Edited by N. Isezaki, I.I. Bersenev et al. Tokyo: TERRA PUB, 1996. 487 p.
- Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № B11. P. 21803–21824. <https://doi.org/10.1029/94SB00988>
- Tamaki K.* Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implication // Bull. Geol. Surv. Japan. 1988. V. 39 (5). P. 269–365. <http://ocean3dprojects.org/oceans-bathymetry...gebco-2014/...>

---

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

### ДИНАМИКА ЭНЕРГИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

© 2022 г. М. И. Ярошевич\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

*\*E-mail: myarosh32@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.10.2021 г.

Выявлена зависимость суммарной энергии двух одновременно действующих тропических циклонов от расстояний между ними в данное время. Рассмотрены хронологически последовательные случаи прохождения тропических циклонов в одном и том же месте. Определена также зависимость суммарной энергии двух циклонов от длительности временного интервала между двумя такими последовательными случаями.

*Ключевые слова:* расстояние между действующими тропическими циклонами, временной интервал между циклонами, энергетическая характеристика циклонов

**DOI:** 10.31857/S0205961422030095

#### ВВЕДЕНИЕ

Особая сложность исследования таких явлений, какими являются тропические циклоны, усугубляется еще и тем, что значительная часть циклонов действуют группами. То есть это ситуации, когда два, а нередко и большее число циклонов, полностью или частично друг с другом совпадают во времени. Таким образом, возникает новая сложная проблема исследования взаимодействия таких циклонов. Игнорирование особенностей взаимодействий циклонов может отрицательно отразиться на уровне достоверности циклонического прогноза. Поэтому исследованию взаимосвязей одновременно действующих тропических циклонов, было уделено большое внимание (Brand S., 1970). Особенно это проявилось во второй половине прошлого века. Активнее расширяются эти исследования с появлением геостационарных спутников (Dritschel D.G., Waugh D.W., 1992; Ситников, Похил, 1998; Ситников, Похил, 1999; Prieto R. and etc., 2003). При этом особое внимание уделяется выявленному кинематическому факту взаимодействия двух циклонов. Тропические циклоны, при определенных расстояниях между ними, совместно вращаются вокруг общей оси, притягивают или отталкивают друг друга. Имеют место ситуации, когда более слабый циклон поглощается более сильным циклоном. Интенсивно развиваются исследования с использованием численных моделей (Chang, 1983), в том числе и более сложных моделей, учитывающих и взаимодействия циклонов с океаном (Фалькович и др., 1992; Фалькович и др., 1993).

Относительно недавно были предприняты дополнительные исследования взаимодействий фрагментарно или полностью во времени совпадающих тропических циклонов (Ярошевич, 2017; Ярошевич, 2019). Здесь методика исследований принципиально иная. В этих исследованиях основным параметром определяющим взаимосвязь тропических циклонов служат энергетические характеристики циклонов. Методической основой исследований является статистика и выявление возможных регрессионных связей между некоторыми параметрами хронологически последовательных циклонов. Так установлено, что скорость нарастания энергии тропического циклона, действующего в группе совпадающих во времени циклонов, предопределяется суммарной энергией предшествующих циклонов группы (Ярошевич, 2017), а по последовательной динамике ослабления группы циклонов возникла возможность “предчувствия” приближения более сильного циклона, названного условно “основным” циклоном группы (Ярошевич, 2019).

Ниже показаны некоторые новые результаты исследований этого направления. Базовой информацией в этих исследованиях стали исходные данные тропических циклонов северо-западной части Тихого океана, произошедших в 1945–2015 гг. (Интернет: Unisys Weather Hurricane-Tropical Data for Western Pacific).

#### РАСЧЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследовалась возможная зависимость суммарной энергии двух одновременно действующих

щих тропических циклонов от расстояния между этими циклонами<sup>1</sup>.

Энергия тропического циклона пропорциональна  $(V_m)^2$ , где  $V_m$  — максимальная скорость циклонического ветра (Голицын, 1997). В метеорологических сводках параметры тропических циклонов и, в частности, значения максимальной скорости ветра и географические координаты, представлены через каждые шесть часов Гринвичского времени. Здесь в качестве суммарной “энергии” двух одновременно действующих тропических циклонов рассматривается величина  $P = (V_{m1})^2 + (V_{m2})^2$ , в которой  $V_{m1}$  и  $V_{m2}$  — соответственно скорости максимальных ветров в одно и то же время двух сопоставляемых тропических циклонов. По соответствующим их географическим координатам, по геодезической формуле, рассчитывается расстояние ( $r_{1,2}$ ) между центрами рассматриваемых циклонов. В результате формируется определенное множество пар значений “ $P-r_{1,2}$ ”.

В этом эксперименте, рассматривались тайфуны и относительно сильные тропические штормы. Приоритетно, рассматривались нарастающие этапы обоих циклонов и в их более интенсивных частях<sup>2</sup>. Из двух циклонов выбирался наиболее сильный циклон. По нему определялась дата и время сопоставления циклонов. При этом чаще всего выбиралась ситуация, когда максимальная скорость ветра этого циклона относительно большая. Из каждой пары циклонов определялась одна пара значений  $P-r_{1,2}$ . При сильных и очень длительных тайфунах, иногда, определялись по две—четыре пары искомым значений.

На рис. 1 представлена регрессионная зависимость суммарной энергии двух тропических циклонов, от расстояния между этими циклонами в одно и то же время. Определенная закономерность этой зависимости просматривается только при  $r_{1,2} < 3200-3300$  км (рис. 1, а).

Для расстояний  $r_{1,2} > 3200-3300$  км (рис. 1, б) не выявилась какая-либо зависимость суммарной энергии от расстояния между циклонами. То есть, похоже, на этих расстояниях энергетическо-

го взаимовлияния циклонов либо его уже нет, либо оно ничтожно мало.

В табл. 1 представлены тропические циклоны и их параметры, по которым рассчитывались графики рис. 1.

Следует здесь коснуться одного, ранее выявленного кинематического взаимодействия двух циклонов — поглощения одного циклона другим циклоном (Ситников, Похил, 1998; Ситников, Похил, 1999).

В большинстве случаев, в сопоставляемое время, энергия одного циклона превосходит, а порой и значительно, энергию второго циклона. В ситуации, когда ураганные ветры более сильного циклона достигают расстояний превосходящие расстояния между циклонами можно в определенном смысле, рассматривать, как поглощение сильным циклоном более слабого циклона. Эта ситуация складывается, когда значения  $r_{1,2}$  относительно малы (начало графика рис. 1, а).

Нередко в течение года, а особенно в периоды наибольшей циклонической активности, разные циклоны, в разное время, фрагментарно проходят через одну и ту же “точку” циклонической зоны. В следующем расчетном эксперименте исследовалась возможная зависимость суммарной энергии двух циклонов ( $P$ ) от длительности временного интервала ( $\Delta t$ ) между последовательными прохождениями этих циклонов над рассматриваемой “точкой”.

В сводках о тропических циклонах их последовательные географические координаты, отражающие центры циклов, представлены с точностью  $0.1^\circ$ . Практически не бывает ситуации, когда обе координаты двух разных циклонов полностью, то есть с точностью до  $0.1^\circ$ , совпадают. Поэтому, в нашем эксперименте под “точкой” понимается площадь круга с центром, обозначенным координатами и радиусом  $R \leq 2^\circ$ <sup>3</sup>. И здесь, “точка” выбирается в нарастающем этапе развития более сильного циклона. Во втором циклоне выбирается время, когда его координаты не выходят за пределы круга принятой “точки” и максимально близки к ее центру.

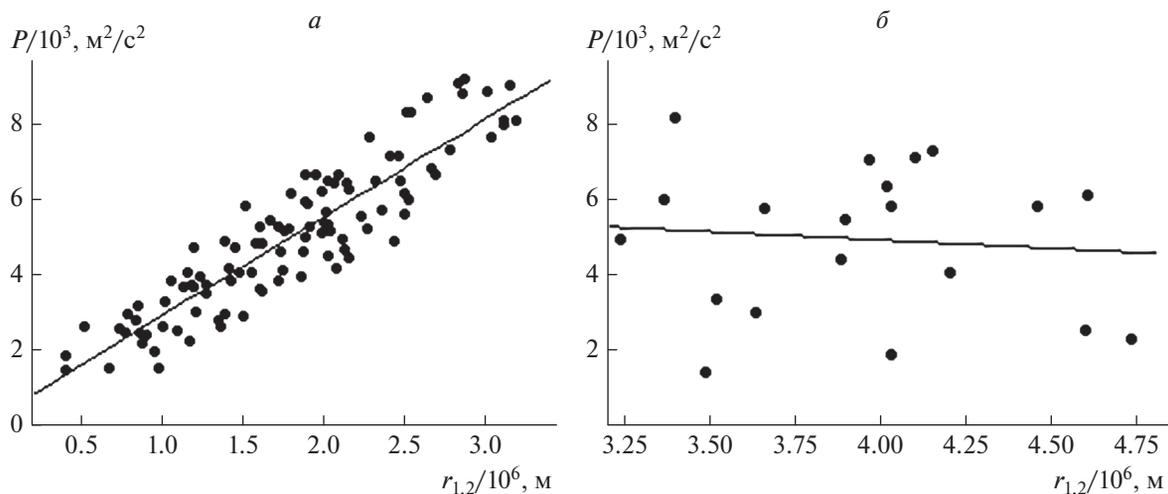
На рис. 2 приведен характер регрессионной зависимости суммарной энергии двух тропических циклонов от интервала времени между последовательными прохождениями этими циклонами одного и того же места (одной и той же “точки”) циклонической зоны.

Закономерности, представленные на рис. 1, а и рис. 2 свидетельствуют об определенной схожести влияния значений  $r_{1,2}$  и  $\Delta t$  на значения  $P$ . На рис. 3 иллюстрируется это противифазное влия-

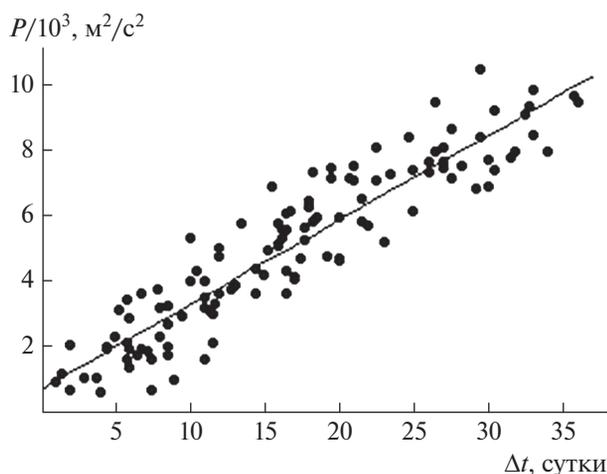
<sup>1</sup> В наших исследованиях одновременно действующие циклоны рассматриваются как энергетически взаимозависимыми. Поэтому исследование зависимости энергии только одного из этих циклонов от расстояния до второго циклона без учета энергии последнего были бы некорректными. Физически логично рассматривать одновременную суммарную энергию обоих тропических циклонов.

<sup>2</sup> Рассматривались нарастающие этапы циклонов так, как именно в этом случае оба циклона стремятся усилиться и логично просматривается конкуренция между ними. На этапах ослабления циклонов не до конца понятна роль конкуренции между ними. Иногда, значительно реже определялись значения  $P-r_{1,2}$  в самом начале этапов спада интенсивности циклонов, предполагая, что в этом случае еще конкуренция возможна.

<sup>3</sup> Принимая во внимание огромные размеры следа тайфунов на поверхности океана, вынужденный выбор размера площади “точек” представляется приемлемо допустимым.



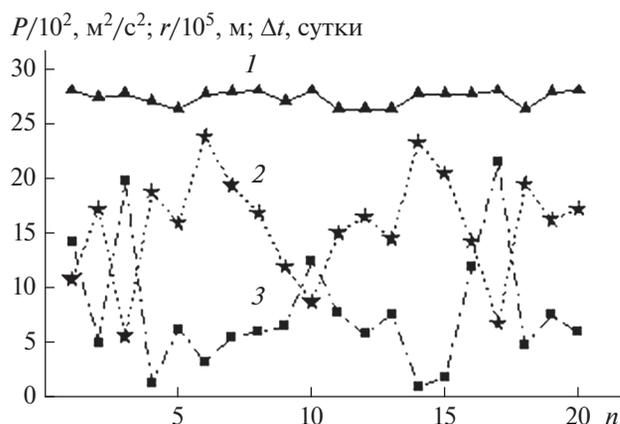
**Рис. 1.** Значение суммарной циклонической “энергии” ( $P$ ), рассчитанное для одного и того же времени, двух одновременно действующих циклонов в зависимости от расстояния ( $r_{1,2}$ ) между этими циклонами. Рис. 1,  $a - r_{1,2} < 3200-3300$  км, рис. 1,  $b - r_{1,2} > 3200-3300$  км. Коэффициент корреляции значений  $P-r_{1,2}$  (рис. 1,  $a$ ) равен 0.904.



**Рис. 2.** Значение суммарной циклонической “энергии” ( $P$ ), рассчитанной в одной и той же “точке” циклонической зоны в зависимости от интервала времени ( $\Delta t$ ) между двумя последовательно прошедшими циклонами через эту “точку”. Коэффициент корреляции значений  $P$  и  $\Delta t$  равен 0.925.

ние. На графике все значения  $P$  довольно близки друг другу. Они результат сочетания самых различных значений  $V_{m1}$  и  $V_{m2}$ . При этом, для каждого значения  $P$  довольно четко прослеживается достаточно четкая отрицательная корреляция значений  $r_{1,2}$  и  $\Delta t$ .<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Расчеты графиков рис. 2 и рис. 3 проведены по тропическим циклонам того же каталога циклонов (северо-западная часть Тихого океана, 1945–2015 гг., Интернет: Unisys Weather Hurricane-Tropical Data for Western Pacific), что и циклоны, по которым формировался рис. 1.



**Рис. 3.** Фрагмент динамики суммарных значений “энергии” ( $P - 1$ ), расстояний ( $r_{1,2} - 2$ ) и интервалов времени ( $\Delta t - 3$ ), рассчитанных по двум “станциям” разных циклонов одного и того же года, ( $n -$  число пар “станций”). Коэффициент корреляции значений  $r_{1,2}$  и  $\Delta t = -0.918$ .

В следующем расчетном эксперименте исследовалась возможная зависимость скоростей перемещения одновременно действующих циклонов от расстояния между ними, рассчитанного для одного и того же времени. По скоростям перемещения обеих циклонов за один и тот же отрезок времени определялось среднее значение скорости, которое и сопоставлялось со значением расстояния между циклонами. В результате расчетов не проявилась какая-либо закономерная зависимость скоростей перемещения циклонов от расстояния между ними.

Таблица 1. Тропические циклоны и их параметры, по которым рассчитывались графики рис. 1

Год	Циклоны номера и названия сокращ.	Дата, время	Координаты 1-го циклона N°–E°	Координаты 2-го циклона N°–E°	$V_m$ , м уз. 1-го циклона	$V_m$ , м уз. 2-го циклона	$r_{1,2}/10^6$ , м	$P/10^3$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
1945	13, 14	24.08 00 ч	26.5–137.3	23.8–128.7	50	70	0.917	1.958
1945	13, 14	25.08 00 ч	30.9–135.8	25.0–132.2	70	75	0.744	2.785
1948	14, 15	14.09 00 ч	22.7–140.7	19.6–128.8	90	70	1.282	3.441
1948	14, 15	14.09 06 ч	23.8–139.6	19.8–128.4	100	70	1.239	3.943
1957	7, 8	18.08 00 ч	22.6–130.2	19.4–112.0	130	55	1.924	5.273
1968	4, 5	23.07 12 ч	20.0–142.0	19.8–125.8	100	45	1.691	3.200
1968	4, 5	24.07 00 ч	20.8–141.1	20.4–124.6	130	55	1.72	5.273
1968	4, 5	24.07 18 ч	22.7–139.3	19.9–122.7	100	60	1.715	3.68
1968	12, 13	30.08 18 ч	18.9–144.0	17.2–160.8	130	60	1.788	5.425
1968	15, 16	20.09 18 ч	19.3–128.6	27.4–142.9	105	95	1.711	5.306
1968	15, 16	21.09 18 ч	22.0–126.2	31.2–143.5	120	70	1.997	5.11
1970	10, 11	28.08 00 ч	27.8–129.8	33.5–143.0	110	80	1.412	4.896
1970	12, 13	05.09 06 ч	26.3–128.0	22.9–130.1	45	50	0.433	1.197
1972	3, 4	01.06 12 ч	12.6–156.1	9.4–143.6	95	30	1.508	2.63
1972	3, 4	02.06 12 ч	15.7–158.1	9.2–145.8	105	30	1.52	3.156
1972	7, 8	09.07 00 ч	12.5–154.8	13.2–140.0	65	100	1.608	3.86
1972	7, 8	10.07 00 ч	13.2–154.0	16.0–137.4	100	130	1.83	7.119
1972	8, 9	10.07 00 ч	16.0–137.4	20.3–116.0	130	55	2.312	5.273
1972	8, 9	11.07 00 ч	17.8–134.2	21.0–116.5	145	65	1.92	6.682
1972	8, 9	12.07 00 ч	18.1–132.8	22.2–117.1	125	50	1.702	4.787
1973	4, 5	14.07 18 ч	20.3–125.4	17.7–114.1	100	45	1.224	3.182
1973	5, 6	19.07 06 ч	28.4–127.1	25.7–138.3	30	105	1.15	3.156
1973	17, 18	05.10 12 ч	14.2–129.5	12.8–112.3	125	60	1.868	5.088
1973	19, 20	15.10 00 ч	14.6–124.6	16.5–108.5	70	15	0.263	1.356
1974	11, 12	19.07 12 ч	26.4–121.8	15.0–125.1	35	90	1.21	2.467
1974	15, 17	17.08 00 ч	27.9–134.2	21.4–141.5	55	45	0.984	1.336
1974	15, 17	18.08 06 ч	28.9–128.5	31.4–139.7	70	25	1.04	1.51
1976	5, 6	19.05 12 ч	15.5–124.7	10.2–147.7	55	130	2.462	5.273
1976	5, 6	21.05 00 ч	16.5–122.1	12.9–145.4	100	120	2.539	6.457
1976	7, 8	28.06 00 ч	21.2–117.9	19.2–132.4	65	105	1.531	4.036
1976	7, 8	29.06 18 ч	21.2–122.3	23.2–136.3	70	95	1.459	3.685
1976	7, 8	30.06 18 ч	22.3–125.1	26.9–141.6	85	85	1.745	3.824
1977	7, 8	31.07 06 ч	24.5–122.5	23.5–140.9	110	30	1.695	3.54
1978	23, 24	12.10 00 ч	15.4–116.6	21.8–124.5	60	65	1.09	2.08
1978	23, 24	13.10 00 ч	15.4–116.4	23.1–122.7	55	80	1.08	2.494
1979	19, 20	26.09 00 ч	23.1–129.1	20.8–139.4	110	35	1.093	3.526
1979	19, 20	26.09 12 ч	23.8–129.3	24.1–137.6	110	25	0.845	3.367
1979	22, 23	11.10 06 ч	12.1–115.1	14.5–139.4	90	140	2.645	7.33
1979	22, 23	12.10 06 ч	12.9–113.8	16.8–137.7	70	165	2.606	8.501
1980	3, 4	15.05 00 ч	19.4–122.9	12.2–141.3	65	110	2.031	4.32
1980	3, 4	17.05 00 ч	20.6–125.3	13.3–141.2	60	110	1.874	4.155
1980	3, 4	18.05 12 ч	20.7–126.7	16.9–139.4	35	105	1.402	3.24
1980	19, 20	16.09 18 ч	20.0–125.1	24.7–137.1	85	50	1.321	2.574
1980	19, 20	17.09 12 ч	20.7–123.1	28.5–136.2	125	55	1.581	4.935
1980	23, 24	09.10 06 ч	19.1–137.0	18.0–158.8	150	15	2.304	6.014
1980	23, 24	10.10 06 ч	20.9–132.1	19.4–154.8	130	20	2.207	4.583

Таблица 1. Продолжение

Год	Циклоны номера и названия сокращ.	Дата, время	Координаты 1-го циклона N °–E°	Координаты 2-го циклона N °–E°	$V_m$ , м уз. 1-го циклона	$V_m$ , м уз. 2-го циклона	$r_{1,2}/10^6$ , м	$P/10^3$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
1981	25, 26	22.11 12 ч	19.6–108.8	12.8–132.8	25	135	2.461	5.02
1982	10, 11	25.07 06 ч	17.2–139.7	17.0–153.3	90	75	1.447	3.632
1982	10, 11	26.07 00 ч	18.3–134.9	16.2–152.0	90	90	1.833	4.287
1982	10, 11	28.07 00 ч	20.8–124.6	16.8–149.6	120	95	2.67	6.199
1982	14, 15	22.08 18 ч	18.3–135.3	12.5–119.1	120	70	1.852	5.107
1982	14, 15	23.08 18 ч	22.1–133.4	12.9–119.0	115	85	1.834	5.412
1982	14, 15	25.08 00 ч	26.1–131.2	17.2–120.2	100	65	1.504	3.764
1982	15, 16	29.08 12 ч	24.3–132.2	24.1–149.3	70	95	1.838	3.685
1983	20, 21	23.11 12 ч	17.0–126.2	8.8–116.6	125	30	1.381	4.373
1984	20, 21	12.10 12 ч	23.9–151.2	17.3–143.8	80	20	1.02	1.81
1984	28, 29	15.11 18 ч	16.9–127.2	8.4–147.2	125	55	2.352	4.955
1984	28, 29	16.11 18 ч	17.9–124.2	10.2–141.3	110	75	2.03	4.69
1985	12, 13	28.08 00 ч	28.2–138.7	22.8–128.8	85	60	1.16	2.865
1985	13, 14	29.08 00 ч	23.6–130.2	27.9–142.6	80	55	1.305	2.494
1985	13, 14	30.08 00 ч	25.8–131.1	32.1–140.1	85	50	1.12	2.573
1985	13, 14	31.08 00 ч	33.2–130.1	37.6–141.0	85	45	1.102	2.448
1985	21, 22	16.10 00 ч	14.1–133.7	17.0–106.7	140	90	2.913	7.331
1986	10, 11	13.08 18 ч	20.8–162.1	18.8–155.9	40	55	0.699	1.224
1986	10, 11	14.08 18 ч	21.7–151.8	19.9–156.4	35	60	0.519	1.277
1986	13, 14	21.08 18 ч	23.7–119.3	21.7–145.2	80	105	2.24	4.611
1986	13, 14	24.08 00 ч	23.2–123.5	22.3–140.0	65	90	1.697	3.261
1987	9, 10	11.08 12 ч	12.2–127.6	9.5–139.2	125	20	1.303	4.241
1987	9, 10	12.08 12 ч	12.9–122.9	11.9–135.2	120	30	1.342	4.049
1987	9, 10	13.08 18 ч	14.8–116.2	15.3–131.3	105	55	1.624	3.718
1987	11, 12	26.08 00 ч	17.9–130.2	14.8–150.3	130	25	2.07	4.637
1987	11, 12	27.08 00 ч	19.9–129.0	16.4–148.4	115	35	1.805	3.824
1988	14, 15	12.09 06 ч	21.0–145.5	23.2–159.9	105	45	1.505	3.454
1988	14, 15	13.09 12 ч	25.0–143.9	25.2–157.9	105	55	1.411	3.718
1989	8, 9	14.07 18 ч	16.4–127.4	17.0–142.3	115	20	1.59	3.605
1989	8, 9	15.07 18 ч	17.9–122.6	20.6–136.3	140	25	1.495	5.352
1989	8, 9	16.07 06 ч	18.3–120.1	21.0–134.0	110	30	1.487	3.44
1989	11, 12	27.07 18 ч	31.8–130.0	24.3–132.2	90	15	0.86	2.203
1989	26, 27	02.10 12 ч	17.8–133.4	18.4–110.5	120	80	2.424	5.504
1990	13, 14	21.08 06 ч	25.4–118.3	28.3–134.8	30	100	1.561	2.88
1991	10, 11	08.08 12 ч	26.9–161.5	19.8–160.8	25	20	0.79	0.271
1991	10, 11	09.08 12 ч	29.8–158.3	21.9–160.5	35	30	0.904	0.562
1991	21, 22	21.09 06 ч	14.5–137.2	21.4–125.6	95	70	1.446	3.685
1991	23, 24	08.10 00 ч	20.8–130.4	17.9–151.2	110	120	2.208	7.013
1991	23, 24	09.10 00 ч	24.1–131.8	20.2–150.6	100	115	1.985	6.146
1991	23, 24	10.10 00 ч	27.1–134.8	22.3–149.7	80	100	1.597	4.34
1992	2, 3	26.06 12 ч	18.2–125.0	15.4–113.2	110	60	1.295	4.154
1992	2, 3	27.06 12 ч	21.8–123.8	17.4–111.3	115	75	1.398	4.988
1994	10, 12	19.07 00 ч	20.8–132.6	26.4–145.5	110	30	1.454	3.44
1994	10, 12	20.07 00 ч	23.8–135.5	26.8–148.9	130	35	1.403	4.796
1994	10, 12	21.07 00 ч	26.9–137.9	26.9–150.9	105	45	1.29	3.453
1994	17, 18	05.08 18 ч	16.8–128.5	28.3–146.8	140	20	2.265	5.292

Таблица 1. Окончание

Год	Циклоны номера и названия сокращ.	Дата, время	Координаты 1-го циклона N °–E°	Координаты 2-го циклона N °–E°	$V_m$ , м уз. 1-го циклона	$V_m$ , м уз. 2-го циклона	$r_{1,2}/10^6$ , м	$P/10^3$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
1994	17, 18	06.08 18 ч	20.0–124.6	26.3–146.3	135	25	2.325	4.988
1994	26, 27	16.09 00 ч	22.8–158.5	14.4–146.2	125	40	1.595	4.558
1994	28, 29	25.09 00 ч	20.3–136.8	28.0–155.9	135	75	2.116	6.312
1994	28, 29	26.09 00 ч	22.7–135.5	28.5–151.5	130	50	1.728	5.134
2001	16, 17	29.08 00 ч	22.8–145.5	29.0–160.8	120	40	1.677	4.234
2001	16, 17	30.08 00 ч	25.0–147.1	36.6–159.4	125	35	1.739	4.459
2002	10, 11	13.07 00 ч	18.7–133.7	28.7–126.5	130	35	1.329	4.796
2003	20, 21	21.10 06 ч	16.6–131.2	21.7–144.5	115	35	1.507	3.824
2003	20, 21	22.10 06 ч	17.8–131.1	23.2–146.8	125	60	1.749	5.087
2004	Mind, Ting.	28.06 18 ч	18.8–124.5	18.6–144.3	125	80	2.088	5.828
2004	Mind, Ting.	29.06 18 ч	19.0–122.7	22.3–142.6	125	75	2.104	5.623
2004	Chab, Aere.	22.08 18 ч	14.8–144.8	22.1–126.9	155	65	2.161	7.476
2004	Chab, Aere.	23.08 18 ч	16.9–141.2	24.4–124.6	150	75	2.18	7.443
2005	Maw.Guch.	23.08 06 ч	26.1–141.2	32.3–147.0	100	55	0.89	3.447
2005	Maw.Guch.	24.08 06 ч	29.7–136.9	36.7–153.0	105	60	1.686	3.87
2006	Saom., Mar.	07.08 00 ч	18.0–139.4	29.6–138.7	75	60	1.22	2.44
2015	Gon., Ats.	17.08 00 ч	16.5–141.7	14.4–159.2	115	75	1.892	4.988
2015	Gon., Ats.	20.08 00 ч	18.9–125.3	21.2–149.5	115	135	2.543	8.323
2015	Kop., Cha.	17.10 18 ч	16.0–122.1	18.8–140.3	130	90	1.958	6.616
2015	Kop., Cha.	18.10 18 ч	17.0–120.1	20.2–140.3	90	125	2.16	6.28

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты логически объяснимые. В среде “атмосфера–океан” условия, благоприятствующие циклонической активности, могут занимать относительно большую территорию циклонической зоны. Но в то же время эти благоприятствующие условия всегда ограничены. В этой ситуации, в определенных условиях, одновременно действующие тропические циклоны, развиваясь, могут энергетически конкурировать между собой (Ярошевич, Ингель, 2006). На малых расстояниях между тропическими циклонами ограниченность благоприятствующих ресурсов сильнее сказывается, чем в случае больших расстояний между циклонами. При больших расстояниях между циклонами конкуренция может вообще не проявляться.

По сути схожая ситуация и при прохождении разных циклонов через одну и ту же “толчку” территории циклонической зоны. Естественно чем

продолжительнее временной интервал между двумя циклонами, тем выше уровень накопления благоприятствующих условий циклонической активности, тем выше суммарная энергия сопоставляемых циклонов.

Использованный источник данных тропических циклонов в настоящее время не существует. При развитии этих исследований потребуются дополнительная проверка данных с использованием современных источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голицын Г.С. Статистика и энергетика тропических циклонов // Докл. Акад. наук. 1997. Т. 354. № 4. С. 535–538.

Ситников И.Г., Похил А.Э. Взаимодействие тропических циклонов между собой и с другими барическими образованиями (часть I) // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 36–44.

*Ситников И.Г., А.Э. Похил.* Взаимодействие тропических циклонов между собой и с другими барическими образованиями (часть II) // *Метеорология и гидрология.* 1999. № 7. С. 36–51.

*Фалькович А.И., Хаин А.П., Гинис И.Д.* Исследование развития и перемещения тропических циклонов в модели океан–атмосфера // *Метеорология и гидрология.* 1992. № 2. С. 23–39.

*Фалькович А.И., Хаин А.П., Гинис И.Д.* Развитие и движение двух взаимодействующих тропических циклонов в совместной модели атмосферы и океана с вложенными движущимися сетками // *Метеорология и гидрология.* 1993. № 7. С. 44–51.

*Ярошевич М.И.* Энергетический признак взаимовлияния группы частично совпадающих во времени тропических циклонов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 5. С. 575–578.

*Ярошевич М.И.* Об одной особенности динамики интенсивностей тропических циклонов, действующих

группой // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55. № 4. С. 45–48.

*Ярошевич М.И., Ингель Л.Х.* Диагноз взаимодействия тропических циклонов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. № 1. С. 44–49.

*Brand S.* Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean // *J. Appl. Meteor.* 1970. № 9. P. 433–441.

*Chang S.W.-J.* A numerical study of the interactions between two tropical cyclones // *Mon. Wea. Rev.* 1983. V. 111. № 9.

*Dritschel D.G., Waugh D.W.* Quantification of inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics // *Phys. Fluids.* 1992. V. 4A. № 8. P. 1737–1744.

*Prieto R., McNoldy B.D., Fulton S.R., Schubert W.H.* A classification of binary tropical cyclone-like vortex interactions // *Mon. Wea. Rev.* 2003. № 131. P. 2656–2666.

## Energy Dynamics of Tropical Cyclones Depending on Their Relative Location

M. I. Yaroshevich

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia*

The dependence of the total energy of two simultaneously operating tropical cyclones on the distance between them at a given time is revealed. Chronologically consecutive cases of tropical cyclones passing in the same place are considered. The dependence of the total energy of two cyclones on the duration of the time interval between two such successive cases was also determined.

*Keywords:* distance between active tropical cyclones, time interval between cyclones, energy characteristic of the cyclone

### REFERENCES

*Golitsyn G.S.* Statistics and energy of tropical cyclones // *Reports of the Academy of Sciences.* 1997. V. 354. № 4. P. 535–538. (In Russian)

*Sitnikov I.G., A.E. Pokhil.* Interaction of tropical cyclones with each other and with other baric formations (Part I) // *Meteorology and hydrology.* 1998. № 5. P. 36–44. (In Russian)

*Sitnikov I.G., A.E. Pokhil.* Interaction of tropical cyclones among themselves and with other baric formations (part II) // *Meteorology and hydrology.* 1999. № 7. P. 36–51. (In Russian)

*Falkovich A.I., Khain A.P., Ginis I.D.* Study of development and movement of tropical cyclones in the ocean-atmosphere model. // *Meteorology and hydrology.* 1992. № 2. P. 23–39. (In Russian)

*Falkovich A.I., Khain A.P., Ginis I.D.* Development and motion of two interacting tropical cyclones in a coupled atmosphere-ocean model with nested moving meshes // *Meteorology and hydrology.* 1993. № 7. P. 44–51. (In Russian)

*Yaroshevich M.I.* Energy sign of mutual influence of a group of tropical cyclones partially coinciding in time // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the at-*

*mosphere and ocean.* 2017. V. 53. № 5. P. 575–578. (In Russian)

*Yaroshevich M.I.* On one feature of the intensity dynamics of tropical cyclones acting as a group // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean.* 2019. V. 55. № 4. P. 45–48. (In Russian)

*Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh.* Diagnosis of the interaction of tropical cyclones // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean.* 2006. V. 42. № 1. P. 44–49. (In Russian)

*Brand S.* Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean // *J. Appl. Meteor.* 1970. № 9. P. 433–441.

*Chang S.W.-J.* A numerical study of the interactions between two tropical cyclones // *Mon. Wea. Rev.* 1983. V. 111. № 9.

*Dritschel D.G., Waugh D.W.* Quantification of inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics // *Phys. Fluids.* 1992. V. 4A. № 8. P. 1737–1744.

*Prieto R., McNoldy B.D., Fulton S.R., Schubert W.H.* A classification of binary tropical cyclone-like vortex interactions // *Mon. Wea. Rev.* 2003. № 131. P. 2656–2666.

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ПЛЕНОЧНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА ПО ДАННЫМ  
ПЯТИЛЕТНЕГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА:  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ**© 2022 г. С. К. Клименко<sup>a, \*</sup>, А. Ю. Иванов<sup>a, b</sup>, Н. В. Терлеева<sup>a</sup><sup>a</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия<sup>b</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

\*E-mail: klimenko.sk@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.10.2021 г.

Анализируются результаты пятилетнего (2017–2021) мониторинга пленочных загрязнений Керченского пролива и его предпроливья. Для мониторинга использовались радиолокационные данные европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, как оперативные, так и архивные, представляющие собой ценный материал для поиска, обнаружения и изучения характера пленочных загрязнений, образованных нефтью, нефтепродуктами и прочими маслянистыми веществами. В ходе мониторинга было обнаружено 2597 пятен пленочных загрязнений общей площадью 1120 кв. км на 481 радиолокационных изображениях. Установлены основные источники загрязнения, в порядке убывания это: рейдовые перегрузочные районы в проливе, порт Тамань с его причальным комплексом, рейдовые/якорные стоянки в Азовском и Черном морях и др. Кроме того, обнаружены места естественных нефтепроявлений на прилегающем черноморском шельфе, создающие свой природный нефтеуглеродный фон, который необходимо учитывать. В результате мониторинга выявлена тенденция к общему снижению количества пленочных загрязнений, несмотря на их рост в 2016–2019 гг. Радиолокационный мониторинг и геоинформационный подход показали свою высокую эффективность для задач оперативного и ретроспективного анализа спутниковых данных на предмет пленочных загрязнений.

*Ключевые слова:* Керченский пролив, пленочные загрязнения, космическая радиолокация, спутниковый мониторинг, источники загрязнения

DOI: 10.31857/S0205961422030071

**ВВЕДЕНИЕ**

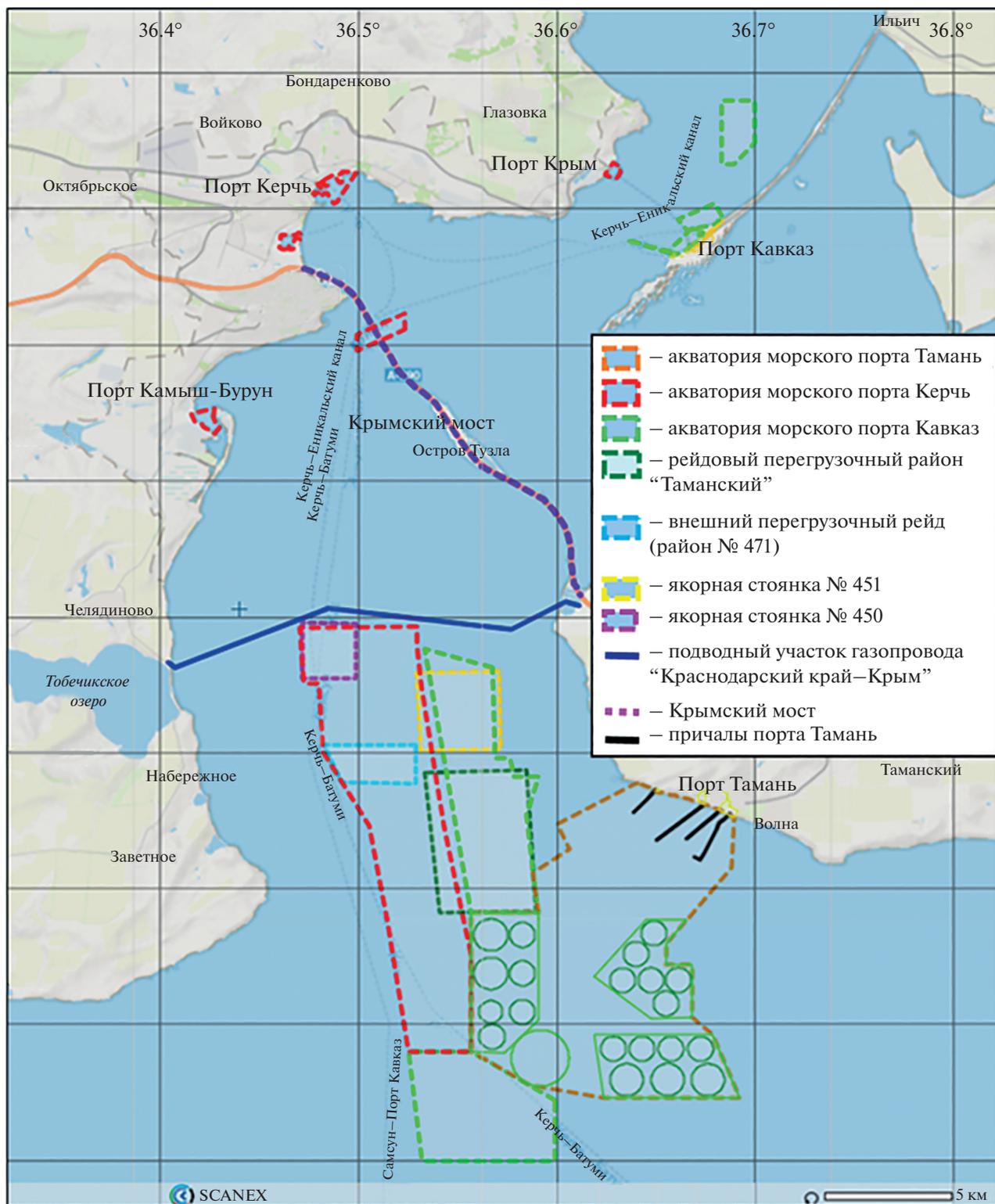
Керченский пролив – важная акватория Азово-Черноморского бассейна, испытывающая высокую антропогенную нагрузку не только из-за активного судоходства, но и за счет интенсивно развивающегося товарооборота. В последние годы наращивается объем грузооборота в портах пролива, в связи с чем увеличилось и количество проходящих судов, что, так или иначе, влияет на экологическое состояние вод исследуемой акватории (Фашук, Петренко, 2008).

Побережье Керченского пролива, полностью хозяйственно освоенное, фактически представляет собой антропогенно-техногенный ландшафт. На берегах пролива расположены Керченский торговый порт, порты Камыш-Бурун, Кавказ и Крым, а в черноморском предпроливье – порт Тамань (рис. 1). Берега пролива соединены Крымским мостом, по которому осуществляется автомобильное и железнодорожное сообщение. Керченский пролив мелководен, поэтому в нем прорыт Керчь-Еникальский канал, который обеспечива-

ет судоходство между Черным и Азовским морями, а порты пролива соединены с ним второстепенными подходными каналами. Более того, в самом проливе фактически находятся производственные объекты – т.н. рейдовые перевалочные районы (РПР) (рис. 1). Строительство Керченского моста в период с 2016 по 2019 г. вместе с дноуглубительными работами в акватории пролива также является примером крайне высокой техногенной нагрузки на воды пролива.

Все эти факторы существенно повлияли на гидрологический и гидробиологический режимы пролива, а также на состояние экосистемы акватории в целом. Поэтому необходимо проводить мониторинг для выявления районов наибольшего загрязнения и дальнейшего контроля с целью улучшения экологической ситуации (Фашук, Петренко, 2008; ИО РАН, 2016; Иванов и др., 2021).

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) крайне эффективны для оперативной и объективной оценки экологического состояния



**Рис. 1.** Схема Керченского пролива с акваториями портов, якорными стоянками и перегрузочными рейдовыми районами, где высок риск появления пленочных загрязнений.

акватории пролива, включая наблюдение за пленочными/нефтяными загрязнениями, взмучиванием вод, выносами рек, сбросами канализации, дампингом грунтов и другими техногенно-антропогенными процессами, влияющими на общее состояние морской среды (Бондур, 2010; Лаврова и др., 2011; Бондур, Замшин, 2012; Евтушенко, 2016; Иванов и др., 2021). Радиолокационные изображения (РЛИ), полученные со спутников, дают возможность анализировать актуальную информацию об интересующей акватории в режиме реального времени (Иванов, 2007; Иванов и др., 2014). Кроме того, полный и частый охват спутниковой съемкой всего Керченского пролива позволяет проводить регулярный мониторинг данной акватории, а также провести ретроспективный анализ имеющихся в базах данных спутниковых снимков и изображений (Иванов и др., 2021).

Хорошо известно, что в результате попадания нефти или другого маслянистого вещества на поверхность моря образуются пятна, различимые на РЛИ, благодаря выглаживанию нефтяной пленкой мелкомасштабного ветрового волнения (Alpers, Espedal, 2004; Иванов, 2007). Выглаженная поверхность моря отражает падающие электромагнитные волны в сторону от источника излучения (от антенны космического радиолокатора). Отразившись от выглаженной морской поверхности, радиоволны большей частью не возвращаются к радиолокатору, в связи с чем область нефтяного пятна отображается темным тоном на РЛИ. Поэтому радиолокация наиболее информативна для поиска пленочных загрязнений по сравнению с зондированием в оптическом диапазоне. Более того, для радиолокации отсутствие солнечного света или облачность не являются ограничением, как для наблюдений в оптическом диапазоне.

Под пленочным загрязнением будем понимать совокупность жидких маслянистых веществ, попадающих в морскую среду благодаря хозяйственной деятельности человека и способных образовать пленки на поверхности моря (Терлеева, Иванов, 2017). Прежде всего, это – легкие фракции нефти и нефтепродукты (различные виды топлива: мазут, дизтопливо, керосин, бензин, горюче-смазочные материалы, нефтехимическое сырье), а также маслянистые вещества, перевозимые наливом, в том числе растительные масла. Среди них выделяют жидкие судовые отходы, которые образуются в результате “жизнедеятельности” судов. Фактически это смеси нефтепродуктов и различных судовых отходов с водой, например, отработка (остатки топлива и отработанных ГСМ), льяльные (трюмные) воды, балластные и промывочные воды, жидкие бытовые отходы (судовая канализация и воды пищеблока), отходы рыбопереработки и т.п. – в море они образуют су-

довые разливы. В отличие от загрязнений сырой нефтью и тяжелыми нефтепродуктами, эти загрязнения обычно формируют на воде тонкие пленки, которые визуально выглядят радужными в месте образования и серебристо-серыми на периферии, а время их жизни на поверхности моря составляет несколько часов (Иванов, 2007).

Строительство Крымского моста, портового комплекса (ПК) Тамань, активное судоходство, перевалка грузов и другие техногенные процессы оказывают сильное воздействие на состояние его акватории. В связи с этим в рамках мониторинга Черного моря, который проводит ИО РАН и ГК СКАНЭКС, проливу уделялось особое внимание, см.: ИО РАН (2016, 2021), СКАНЭКС (2019а, 2019б, 2019с, 2020а, 2020б). Более того, данные ДЗЗ, накопленные за пятилетний период (с 2017 г.), требовали тщательного анализа и интерпретации. Дистанционный мониторинг Керченского пролива и прилегающих акваторий, помимо радиолокации, подразумевал сбор всех спутниковых данных, находящихся в свободном доступе, включая снимки высокого и среднего разрешения спутников Sentinel-2, Landsat-8, Spot, WorldView и др., а также всей другой информации, позволяющей проводить идентификацию пятен, обнаруженных в данных ДЗЗ. В настоящей работе представлены результаты анализа данных радиолокационного спутникового мониторинга пленочных загрязнений Керченского пролива и прилегающих к нему акваторий в период с января 2017 г. по декабрь 2021 г., что позволило выявить основные районы концентрации пленочных загрязнений, источники загрязнения и тенденции в их динамике.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для мониторинга акватории Керченского пролива и последующего анализа использовались РЛИ европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B. Изображения становились доступны после того, как загружались на оперативный геопортал ГК СКАНЭКС из базы данных Copernicus Open Access Hub Европейского космического агентства в виде радиолокационных продуктов GRD. Для мониторинга они использовались в режиме съемки IW (Interferometric Wide) с вертикальной поляризацией сигнала и оригинальным разрешением 10 м. Район интереса был выбран таким образом, чтобы охватить им как акваторию самого пролива, так и предпроливье в Азовском и Черном морях, которые генетически связаны в части загрязнения с проливом.

Визуальное дешифрирование (или извлечение полезной информации из комических снимков с помощью зрительной системы человека, которая имеет крайне высокую способность к распознаванию образов) заключается в эксперт-

ном выделении областей РЛИ, соответствующих по совокупности своих признаков пятнам пленочных загрязнений. Такие признаки обусловлены особенностями формирования и динамики пятен нефти/нефтепродуктов на поверхности моря и, соответственно, особенностями их отображения на РЛИ (Иванов, 2007; Alpers, Espedal, 2004; Ivanov, 2011; Alpers et al., 2017). К ним относятся форма, размеры, характер края, контраст и т.п. информация. Основными признаками в случае визуального дешифрирования сигнатур является тон (яркость), текстура изображения и контраст на фоне окружающей морской поверхности. Немаловажным фактором при распознавании пятен загрязнений часто является учет гидрометеорологических условий (ГМУ), в частности направления и скорости ветра, а по возможности и течений, а также контекстное окружение (близость судовых трасс, рейдовых стоянок, портов, нефтегазовых платформ и т.п.).

Дальнейшая интерактивная обработка и анализ РЛИ обычно осуществляется поэтапно с использованием промежуточных или дополнительных результатов/данных для получения более достоверной информации и верификации результатов визуальной интерпретации. Тем не менее визуальное дешифрирование, подкрепленное другими данными информацией, до сих пор часто остается основным методом анализа (Иванов, 2007).

Для обнаружения пятен пленочных загрязнений использовались космические РЛИ радиолокационных спутников Sentinel-1. Обнаружение и идентификация пятен пленочных загрязнений на них предварительно осуществлялась визуальным методом с учетом контекстной обстановки. Далее проводился интерактивный анализ с помощью инструментов веб-ГИС приложения “Геомиксер” (<http://geomixer.ru>), где уже имеющиеся географически привязанные РЛИ анализировались с привлечением дополнительной информации о конкретной акватории. Для анализа и идентификации обнаруженных на РЛИ пятен использовался геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затягалова, 2007), суть которого заключается в учете набора различных объективных океанографических, гидрометеорологических, навигационных и промышленных факторов (в частности, данных навигационных карт, батиметрии, нефтегазового комплекса, полей ветра и ГМУ), а также комплексной информации о водном бассейне, характеризующих место обнаружения пятна, и окружающую оперативную судовую обстановку по данным систем автоматической идентификации судов – АИС. Все это было доступно для анализа благодаря тому, что порталы ГК СКАНЭКС позволяют подключение внешних слоев и геопространственных данных из международных геоинформационных сервисов и баз данных по протоколу WMS (Web Map Service) (подробнее

про ГИС-подход и возможности приложения “Геомиксер” см. также: Ivanov, Zatyagalova (2008), Ivanov (2011), Иванов и др. (2014)).

Интерактивный анализ с помощью ГИС-подхода включал в себя следующие последовательные действия, выполняемые в веб-ГИС картографическом приложении “Геомиксер”:

1) визуальное дешифрирование пятен пленочных загрязнений, отбор кандидатов в пленочные загрязнения и их интерактивный анализ, в том числе с помощью специализированных компьютерных модулей,

2) итоговая экспертная оценка природы слика и определение положения (координат) источника пятна,

3) выделение и векторизация, как отдельных разновременных сликков, так и их групп, с последующим созданием векторных слоев, пригодных для внесения в ГИС-проект,

4) пространственно-временной анализ всех доступных радиолокационных съемок,

5) сопоставление результатов обнаружения пятен-сликков с доступными подспутниковыми данными и материалами.

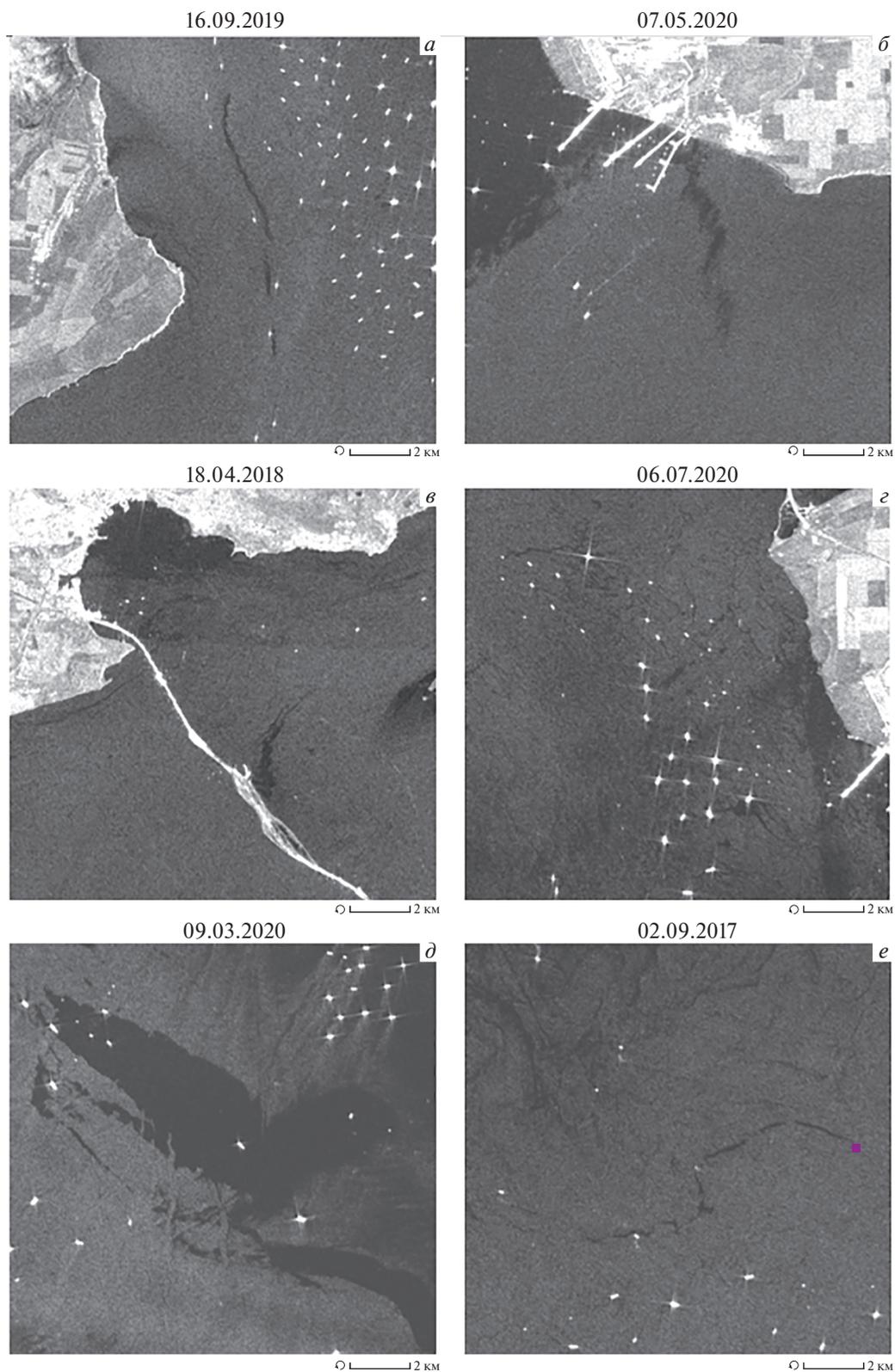
Типичные пятна пленочных загрязнений Керченского пролива показаны на рис. 2. Карты пленочных загрязнений за каждый год в рамках ГИС-подхода создавались путем объединения всех слоев с пятнами, обнаруженными на каждом РЛИ, полученном в течение года. Для этого может использоваться как обычная, так и специализированная ГИС. В итоге в рамках ГИС-подхода основные источники загрязнений (рис. 2), особенно в проливе, на интегральных картах загрязнений (рис. 3), полученных за длительный период, выявляются практически автоматически (рис. 4, а, 4, б).

Кроме того, интегральная карта пленочных загрязнений, составленная на основе анализа массива РЛИ за пять лет (см. рис. 3), позволяет выделить районы наибольшей концентрации пятен загрязнений и дает информацию об источниках загрязнения, как наглядно показано на рис. 4, а.

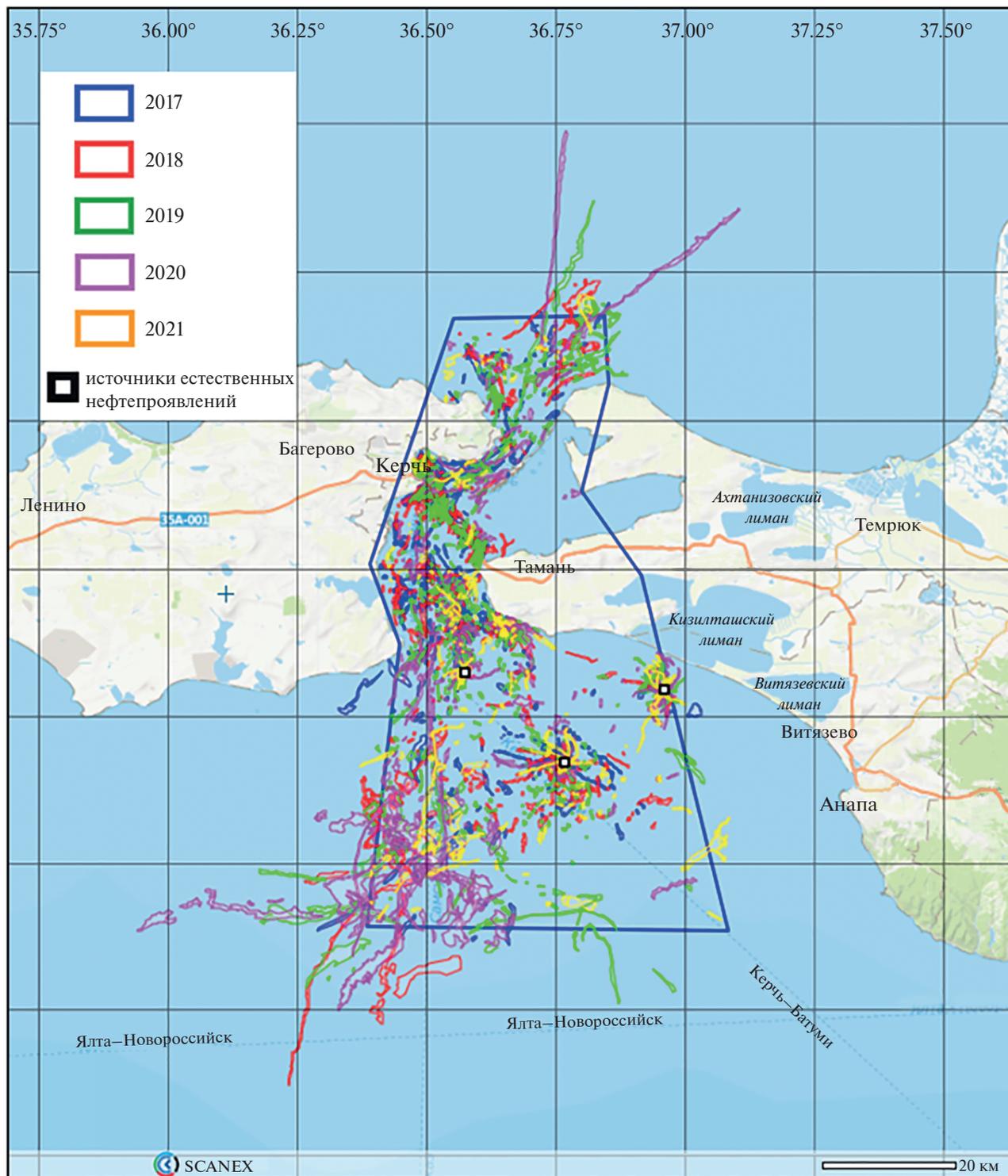
#### ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

В период с 2017 по 2021 гг. пятна пленочных загрязнений в Керченском проливе и прилегающих предпроливных были обнаружены на 481 РЛИ. Всего было обнаружено 2597 пятен-сликков общей площадью 1120.4 км<sup>2</sup>.

Как неоднократно отмечалось, активное судоходство и перевалка грузов – один из главных источников загрязнения акватории Керченского пролива (Иванов и др., 2021; ИО РАН, 2016; СКАНЭКС, 2019с). Разливы могут образовывать-



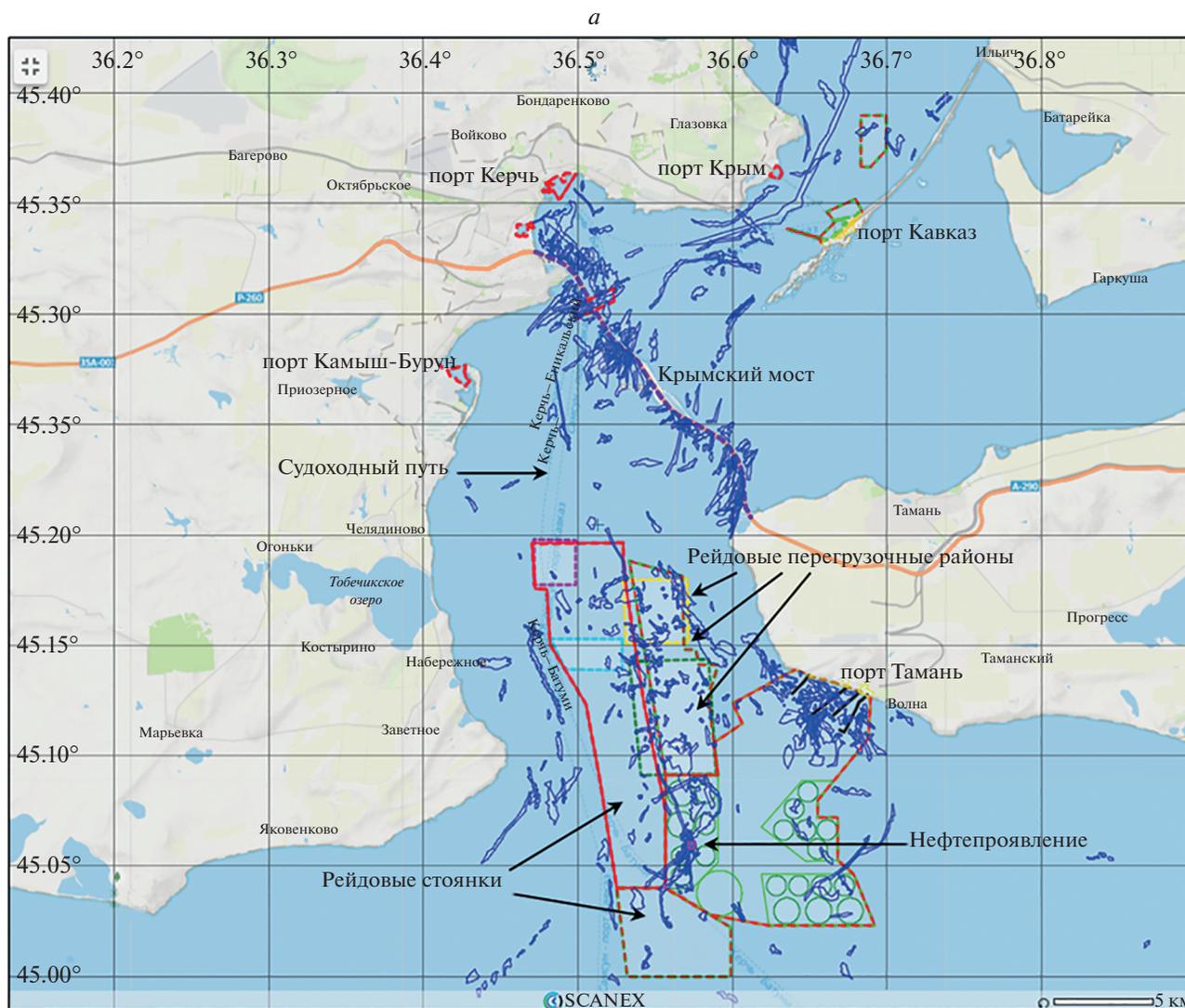
**Рис. 2.** Типичные загрязнения Керченского пролива и предпроливья, обнаруженные на радиолокационных изображениях: *a* – судовой разлив на основной судоходной трассе; *б* – крупный разлив у выносных причалов порта Тамань; *в* – техногенное пленочное загрязнение у Крымского моста; *г* – судовые разливы на перегрузочных рейдовых стоянках в проливе; *д* – крупный судовой разлив на рейдовой стоянке в открытом Черном море; естественное нефтепроявление (сиреневый квадратик – источник). © ESA.



**Рис. 3.** Сводная интегральная карта пленочных загрязнений Керченского пролива и прилегающих акваторий, обнаруженных по данным спутникового мониторинга 2017–2021 гг.

ся на морской поверхности в результате сбросов балластных, льяльных, бытовых вод или других жидких отходов, а также из-за утечек при перевалке различных маслянистых продуктов на рейдовых стоянках и РПР.

В ходе анализа карт распределения пленочных загрязнений в проливе было выделено несколько районов с максимальной концентрацией пятен – фактически источников загрязнения; в порядке убывания это: Таманский портовый комплекс,



**Рис. 4.** (а) Пример выявления источников загрязнения: совмещение в приложении “Геомиксер” интегральной карты пленочных загрязнений за 2019 г. с границами портов, рейдов и якорных стоянок. (б) Карта-схема пленочных загрязнений (контуры) в акватории причального комплекса Тамань по данным радиолокационного мониторинга 2020–2021 гг. Наибольшая концентрация пленочных загрязнений в обнаружена у причала ООО “Пищевые ингредиенты”.

перегрузочные рейды в проливе и предпроливье, Крымский мост, якорные стоянки в азовском и черноморском предпроливьях, порт Керчь и др. Рассмотрим их подробнее.

**Портовый комплекс Тамань.** Порт Тамань и его ПК – один из крупнейших портов Черноморского бассейна по грузообороту и крупнейший порт на данной акватории, чья доля в общем грузообороте Азово-Черноморского бассейна составляет порядка 13–15% (Ассоциация морских портов, 2021). Он представляет собой причальный комплекс, состоящий из четырех выносных причалов длиной от 1.7 до 2.4 км, принадлежащих: ООО “ОТЭКО-Портсервис” (терминал № 1), ООО “Пищевые ингредиенты” (№ 2) ОАО, ЗАО “Таманьнефтегаз” (№ 3) и “Тольяттиазот” (№ 4), со-

ответственно (Морской порт Тамань, 2021); см. рис. 1. Общая пропускная способность ПК в совокупности составляет около 55 млн тонн в год, а на его причалах происходит перевалка нефтепродуктов и сжиженных углеводородных газов, наливных и насыпных пищевых продуктов, прочих навалочных грузов (Морской порт Тамань, 2021).

Перечисленные выше компании и принадлежавшие им предприятия на суше осуществляют погрузку/перегрузку сухих и жидких грузов, в том числе нефтепродуктов, сжиженного углеводородного газа, масложирового сырья и т.п. веществ, способных образовывать пленки на морской поверхности. В 2012 г. были закончены работы по углублению операционных акваторий и подходного канала к Таманскому перегрузочному ком-

б

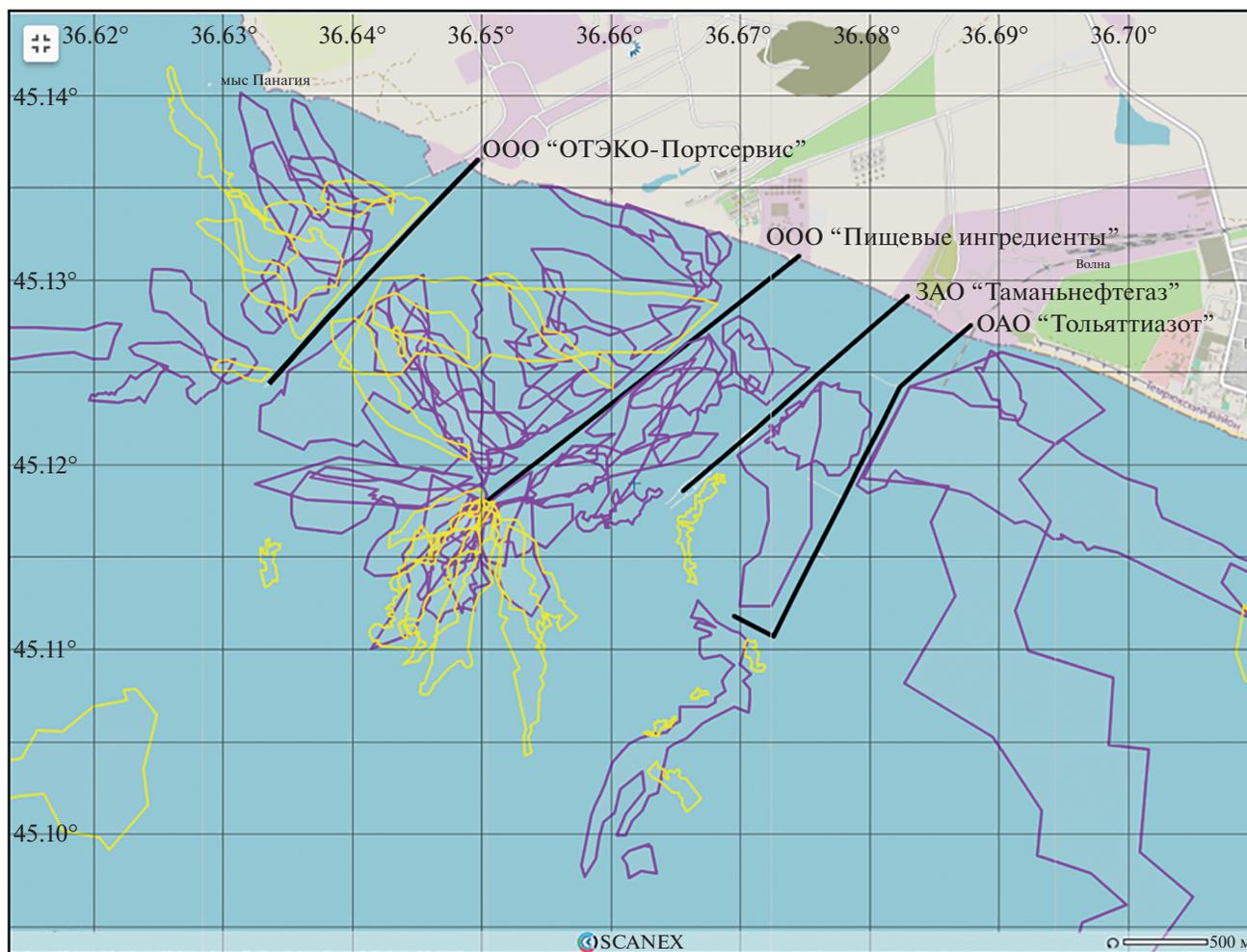


Рис. 4. Окончание

плексу. Строительство Таманского терминала навалочных грузов «ОТЭКО-Портсервис» началось в 2014 г., а в марте 2019 г. он притупил к работе. Дноуглубительные работы были продолжены в связи с обустройством операционной акватории.

Еще в 2016 г. (Евтушенко, 2016) было отмечено, что как на РЛИ, так и на оптических снимках, у причалов ПК наблюдались пятна пленочных загрязнений. Вполне очевидно, что выявленные здесь пленочные загрязнения (рис. 4, б) обусловлены как перевалками и погрузками наливных грузов, так и утечками/сбросами с судов в рамках судовых операций; они наблюдались главным образом у причала № 3, причем самые крупные пятна достигали 3–3.5 км<sup>2</sup>. Пятна в данном районе наблюдались достаточно часто: каждый месяц на каждом втором или третьем снимке при благоприятных ГМУ, а площадь снимков у ПК в среднем варьировалась от 0.1 до 0.6 км<sup>2</sup>.

**Рейдовые перегрузочные районы.** Рейдовые перегрузочные районы расположены в акватории Керченского пролива – № 451 и западнее от перегрузочного комплекса «Тамань» в керченском предпроливье (рис. 1). В пределах этих РПР происходят перегрузки различных жидких и сыпучих веществ с судов типа «река–море» на морские танкеры и сухогрузы для дальнейшей транспортировки (ИО РАН, 2016; Иванов и др., 2021). Операции по перевалке нефтепродуктов в условиях открытого моря достаточно часто сопровождаются выбросами и утечками, которые могут образовывать пленочные загрязнения и достаточно часто регистрировались на РЛИ в виде мелких пятен округлой или удлинённой формы. Обнаруженные здесь пятна преимущественно имели небольшие размеры (самое крупное имело площадь около 3 км<sup>2</sup>), тем не менее, часто они наблюдались в большом количестве, что можно увидеть на сводной карте (рис. 3) и на рис. 4, а. Более того, было

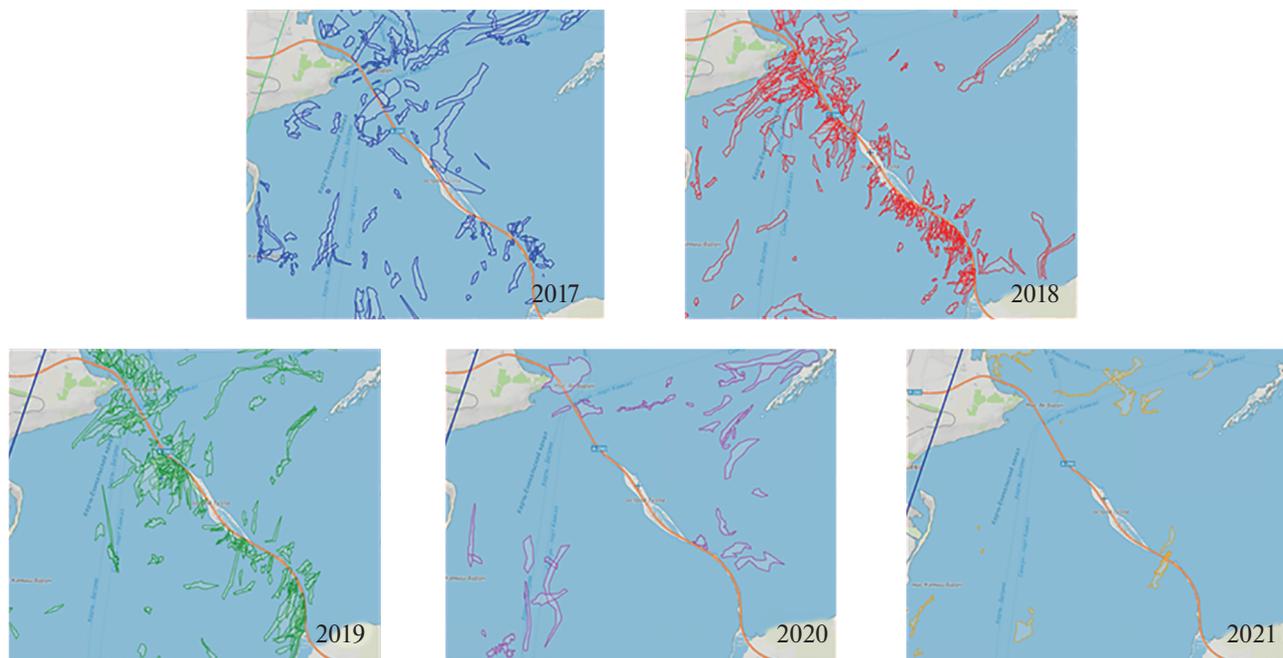


Рис. 5. Пленочные загрязнения у Крымского моста в период с января 2017 по декабрь 2021 г. по данным спутникового радиолокационного мониторинга.

отмечено, что наибольшая концентрация пленочных загрязнений в районе данного участка акватории приходится на перевалочную стоянку порта Кавказ, где количество загрязнений от года к году относительно стабильно и тенденции к его увеличению нет. Большею частью площадь пленок здесь не превышала 1 км<sup>2</sup>.

**Азовская и черноморская рейдовые/якорные стоянки.** Данные рейды расположены в предпроливьях Азовского и Черного морей. В них происходит стоянка судов, ожидающих разрешения на проход проливом. Обнаруженные здесь разливы невелики, однако время от времени, особенно с осени 2019 г., они стали достигать значительных площадей (например, разливы на РЛИ Sentinel-1В от 15.12.2019 площадью 25 км<sup>2</sup>, а на РЛИ Sentinel-1А от 29.07.2020 – 26 км<sup>2</sup>) и более (так, на РЛИ Sentinel-1В от 9.03.2020 был обнаружен разлив площадью около 50 км<sup>2</sup> – см. рис. 2, д). Трудно предположить, что эти разливы сформированы нефтью/тяжелыми нефтепродуктами – скорее всего, они образованы судовыми отходами с остатками нефтепродуктов, что характерно для жидких отходов (Терлеева, Иванов, 2017), которые в благоприятных ГМУ образуют такие большие пятна.

Вопрос о том, легально или нелегально происходит эти сбросы, остается открытым. Однако известно, что сбросы вод, содержащих нефтепродукты, в этих районах должны регулироваться международными природоохранными конвенциями, например, МАРПОЛ (МАРПОЛ, 2008).

Данную тенденцию также можно объяснить тем, что, например, черноморская рейдовая/якорная стоянка расположена вне территориальных вод РФ, где не действуют жесткие ограничения конвенций. В связи с этими причинами появления крупных пленочных загрязнений можно считать нарушением положений конвенций об охране окружающей среды из-за ненадлежащего контроля судоходства со стороны природоохранных ведомств.

**Крымский мост.** Крымский мост – транспортный переход через Керченский пролив, соединяющий Керченский и Таманский полуострова, является одним из важнейших социально-экономических объектов РФ. В период строительства, главным образом в 2018 и 2019 гг., в его окрестностях наблюдалось большое количество пятен пленочных загрязнений (рис. 5). Они были обусловлены попаданием в морскую среду остатков топлива и ГСМ от машин и механизмов, задействованных при строительстве, а сразу после его окончания – с ливневыми стоками с дорожного полотна (СКАНЭКС, 2019б).

Затем ситуация стабилизировалась, наметилась тенденция к существенному уменьшению масштабов загрязнения: после завершения строительства моста с 2020 г. обнаружено резкое сокращение пятен на акватории, примыкающей к мосту, что подтверждают результаты мониторинга и, в частности, карты на рис. 5. Типичные пленочные загрязнения здесь – это слики наибольших раз-

меров (длина до 1–1.5 км, площадь 0.1–0.6 км<sup>2</sup>), примыкающие к мосту с севера и юга.

**Порты Керченского пролива.** Кроме портового комплекса Тамань в акватории Керченского пролива расположены порты Керчь, Кавказ, Крым и Камыш-Бурун (рис. 1). Среди них по количеству разливов можно выделить первые два, а наибольшее количество пленочных загрязнений среди них было сосредоточено в Керченской бухте, хотя в 2020 г. пришелся их минимум. Площади обнаруженных загрязнений на акватории морского порта Керчь варьируют от 0.01 до 2 км<sup>2</sup>. Причем генезис загрязнений в бухте и на прилегающих акваториях самый разнообразный: от различных утечек в порту и до сбросов производственных вод из систем крупных керченских промышленных предприятий. В акватории, примыкающей к п-ову Чушка, в водах порта Кавказ наблюдалось гораздо меньшее количество пленочных загрязнений, причем максимум их численности приходился на 2017 и 2020 гг.; они имели небольшие размеры площадью от 0.1 до 1.5 км<sup>2</sup>. Наиболее “чистым” оказался порт Камыш-Бурун.

**Основная судоходная трасса.** Главный судоходный путь в проливе следует Керчь-Еникальским каналом, которым ходят суда из Черного в Азовское море и обратно (рис. 1). Необходимость в канале возникла из-за небольшой глубины пролива – средние значения составляют всего 4 м.

Пропускная способность канала достигает 100–150 судов в сутки, которые перевозят, в том числе, нефть и нефтепродукты, что может повлечь за собой появление пленочных загрязнений на данной судоходной трассе. Поэтому здесь также время от времени наблюдались судовые разливы, характеризующиеся вытянутой формой и располагающиеся вдоль фарватера канала. Их длина согласно данным мониторинга в среднем не превышала 7–8 км. Некоторые судовые разливы начинались еще в открытом море, даже вне территориальных вод, и заканчивались в проливе. Так в марте 2019 г. (8.03.2019) был обнаружен разлив в азовской части района интереса длиной около 30 км. Максимальные по длине судовые разливы были обнаружены в марте 2020 г. на судоходной трассе, следующей из Керченского пролива в Черное море; их длина варьировала от 15 до 22 км. Отмечен постепенный рост количества загрязнений судового происхождения в районе главной судоходной трассы в проливе. Отметим и то, что после постройки Крымского моста из всех судоходных путей пролива остался только этот – и теперь все суда идут только главным каналом и, соответственно, наиболее крупные судовые разливы проявляются на его трассе или рядом.

**Естественные нефтепроявления.** Кроме судовых разливов в ходе мониторинга были обнаружены места концентрации нефтяных пятен вне

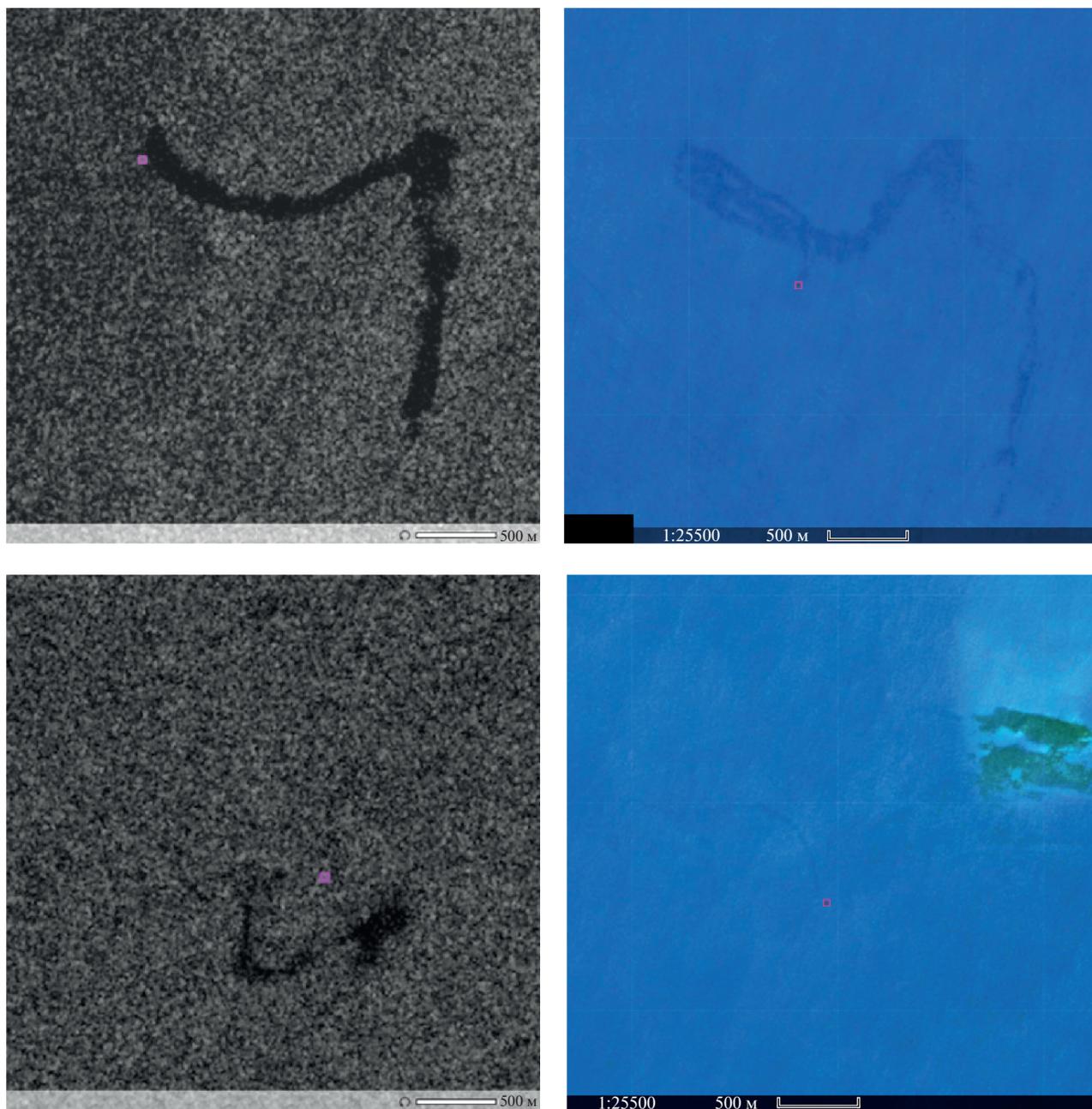
районов антропогенной нагрузки. Естественное высачивание нефти на дне моря создает группы пятен на морской поверхности или нефтепроявления, которые приурочены к одному и тому же источнику (обычно эруптивным структурам морского дна – сипам, грифонам и т.п.). Таким образом, пространственно-временная группировка пятен-сликов, обнаруженных на серии РЛИ около одной точки, однозначно указывает на подводной источник на дне (Иванов и др., 2020). Если в этом месте нет затонувших судов, выпусков подводной канализации или поврежденных трубопроводов, то источник – естественный.

Примеры отображения сликов согласно данным ДЗЗ приведены на рис. 6, причем индивидуальные пятна имели длину 0.3–12 км и площадь 1–2.5 км<sup>2</sup>. По результатам предварительного анализа ежегодных интегральных карт с помощью ГИС-подхода установлено, что источниками этих пятен могут быть естественные нефтепроявления (на рис. 3, 7–9), так как информации об авариях судов или нахождении трубопроводов в данных местах нет.

Более детальный анализ позволил выявить три кластера пятен, формирующих веерные структуры (рис. 7). В 2017–2021 гг. эти пятна в данных радиолокации регистрировались достаточно часто: ежегодно на 40–70 РЛИ. Пятна группировались около точек с координатами 44°56′19″ с.ш. и 36°46′03″ в.д. (источник № 1), 45°02′08″ с.ш. и 36°57′28″ в.д. (источник № 2), и 45°03′34″ с.ш. и 36°34′25″ в.д. (источник № 3) и расположены на мелководном участке шельфа на глубинах 32, 18 и 19 м, соответственно (рис. 8). Обнаруженные группы пятен находятся в хорошо известном районе распространения подводного грязевого вулканизма и газовыделений (Шнюков и др., 1986; Шнюков, 2014). Более того, эти нефтепроявления находятся в границах Таманского нефтегазоносного района, который характеризуется достаточно перспективной нефтегазоносностью (Глумов и др., 2014). Все это с высокой вероятностью также позволяет говорить о наличии подводных источников на дне, ответственных за нефтепроявления, наблюдаемые на поверхности моря.

Ряд пятен-сликов пока неизвестного происхождения время от времени наблюдался между банками Аксенова, Савенко и Андреева (рис. 8; место показано эллипсом). Вполне вероятно, что и здесь на глубинах 13–15 м тоже могут находиться источники естественных нефтепроявлений, однако выбрасывающие, судя по имеющимся данным, нефть крайне эпизодически.

В итоге, так как эти нефтепроявления лежат в рамках Таманского нефтегазоносного района и Керченско-Таманской грязевулканической области, находятся недалеко друг от друга и их проявления на поверхности моря часто происходят од-

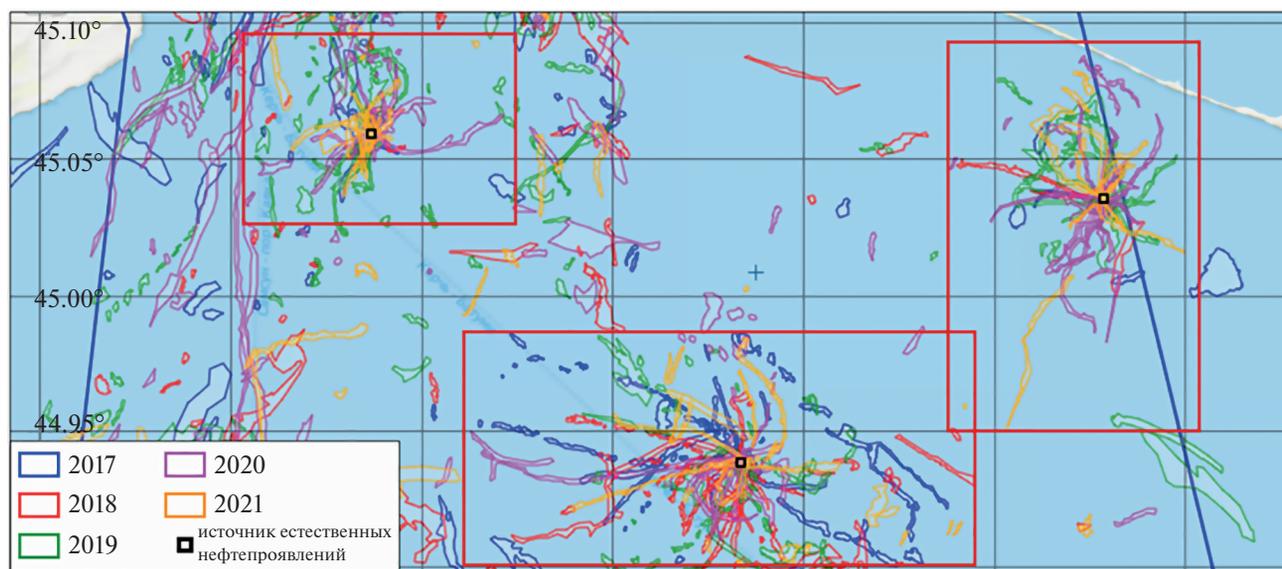


**Рис. 6.** Квазисинхронное отображение нефтепроявлений № 1 (вверху) и № 2 (внизу) на космоснимках от 13.04.2020: на радиолокационном изображении Sentinel-1B (03:40 UTC) и оптическом снимке Sentinel-2B (10:33 UTC) (справа отобразилась банка Марии Магдалины). © ESA.

новременно, можно утверждать, что они принадлежат к одной и той же флюидодинамической (грязевулканической) системе (рис. 9). Вероятно, к этой же системе относятся и недавно обнаруженное нефтепроявление в Азовском море и источник у Бугазской косы в Черном море (Иванов и др., 2020; СКАНЭКС, 2020а, 2020б). Анализ доступного геолого-геофизического материала привел к заключению, что эти нефтепроявления могут быть обусловлены существующей нефтега-

зоносностью и процессами миграции нефтеуглеводородов в осадочном комплексе северо-восточной части Черноморского бассейна.

Доля естественных нефтепроявлений от общего количества обнаруженных и идентифицированных в ходе мониторинга пленочных загрязнений в среднем составляет порядка 11.5%. (см. табл. 1). Наблюдаемые слики были различной формы, длины, площади и контраста – в зависимости от погодных условий во время съемки акватории.



**Рис. 7.** Сводная карта пленочных снимков, маркирующих естественные нефтепроявления в черноморском предпроливье, по данным спутникового мониторинга 2017–2021 гг.

В зимние месяцы пятна естественных нефтепроявлений обнаруживались редко, т.е. не отображались на РЛИ, полученных при скорости ветра, превышающей 5–6 м/с, что характерно для осенне-зимних сезонов. Это может говорить о том, что высачиваются легкие фракции нефти, пленки которых под действием ГМУ быстро исчезают с поверхности моря.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате пятилетнего радиолокационного мониторинга было обнаружено 2597 пятен пленочных загрязнений общей площадью 1120 км<sup>2</sup>. Установлены основные источники загрязнения пролива: рейдовые перегрузочные районы в проливе, порт Тамань с его причальным комплексом и рейдовые/якорные стоянки в азовском и черно-

морском предпроливьях. Порты пролива и главный судоходный путь представляют меньшую угрозу, хотя время от времени здесь появляются крупные разливы. До 2020 г. одним из источников загрязнения был Крымский мост, влияние которого на экосистему пролива сейчас свелось к минимуму.

На рис. 10 представлена статистика пятилетнего мониторинга, в которой просматривается тенденция к уменьшению количества пятен пленочных загрязнений. Из рисунка видно, что наибольшая площадь загрязнений пришлась на 2020 г., что можно объяснить крупными судовыми разливами, произошедшими в районе Черноморского рейда вне территориальных вод РФ. Тем не менее, несмотря на выявленную тенденцию к общему снижению, проблема загрязнения пролива остается не решенной.

**Таблица 1.** Количество и доля естественных нефтепроявлений (ЕН) от общего количества обнаруженных пятен за время мониторинга

Год	Общее количество пятен	Количество ЕН	Общая площадь, кв. км	Доля ЕН, %
2017	460	52	158.9	11.3
2018	642	46	211.9	7.2
2019	770	70	253.2	9.1
2020	435	50	385	11.5
2021	290	46	111.4	15.9
Среднее				11.0
Итого	2597	264	1120.4	

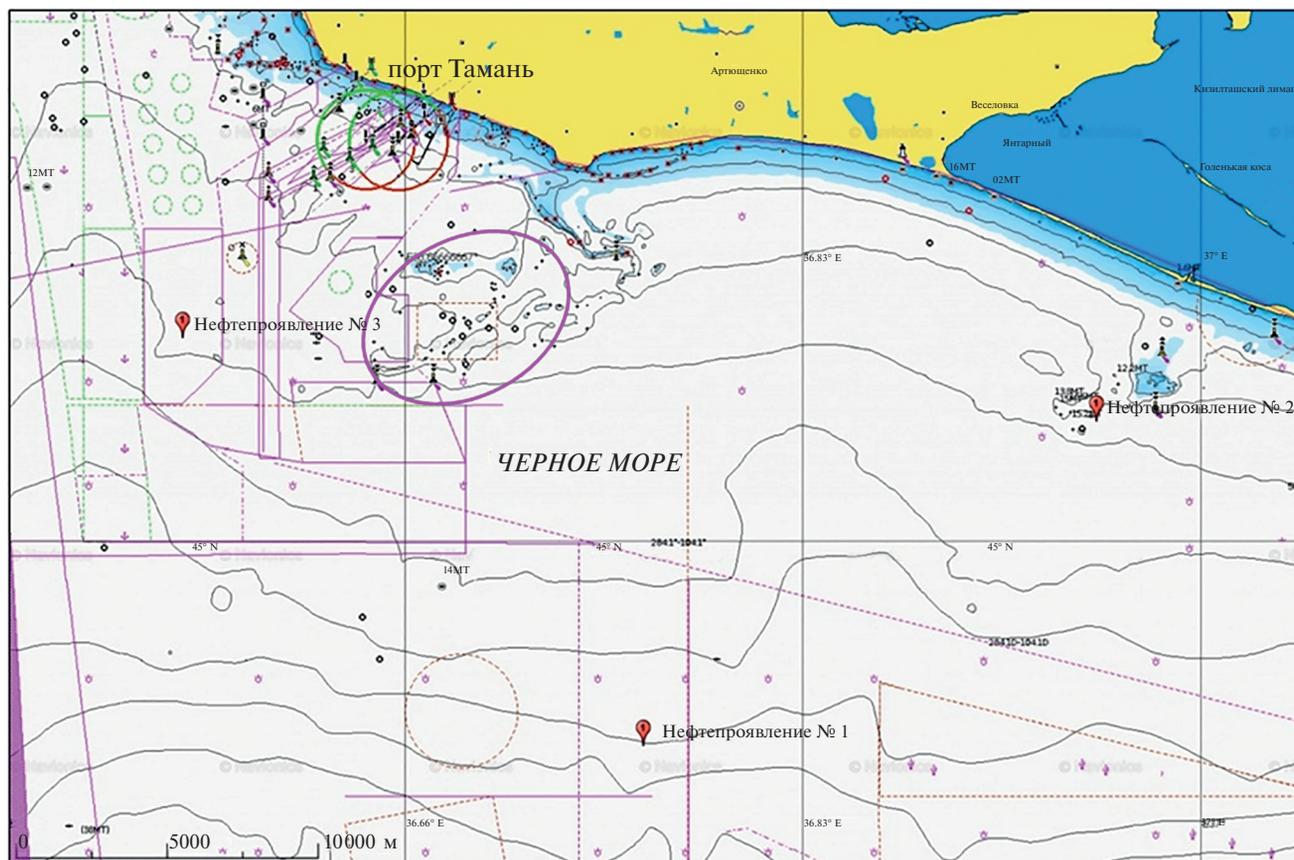


Рис. 8. Положение нефтепроявлений, обнаруженных в ходе мониторинга, на навигационной карте; овалом показан район, где нефтепроявления также возможны (Глазырин, 2021).

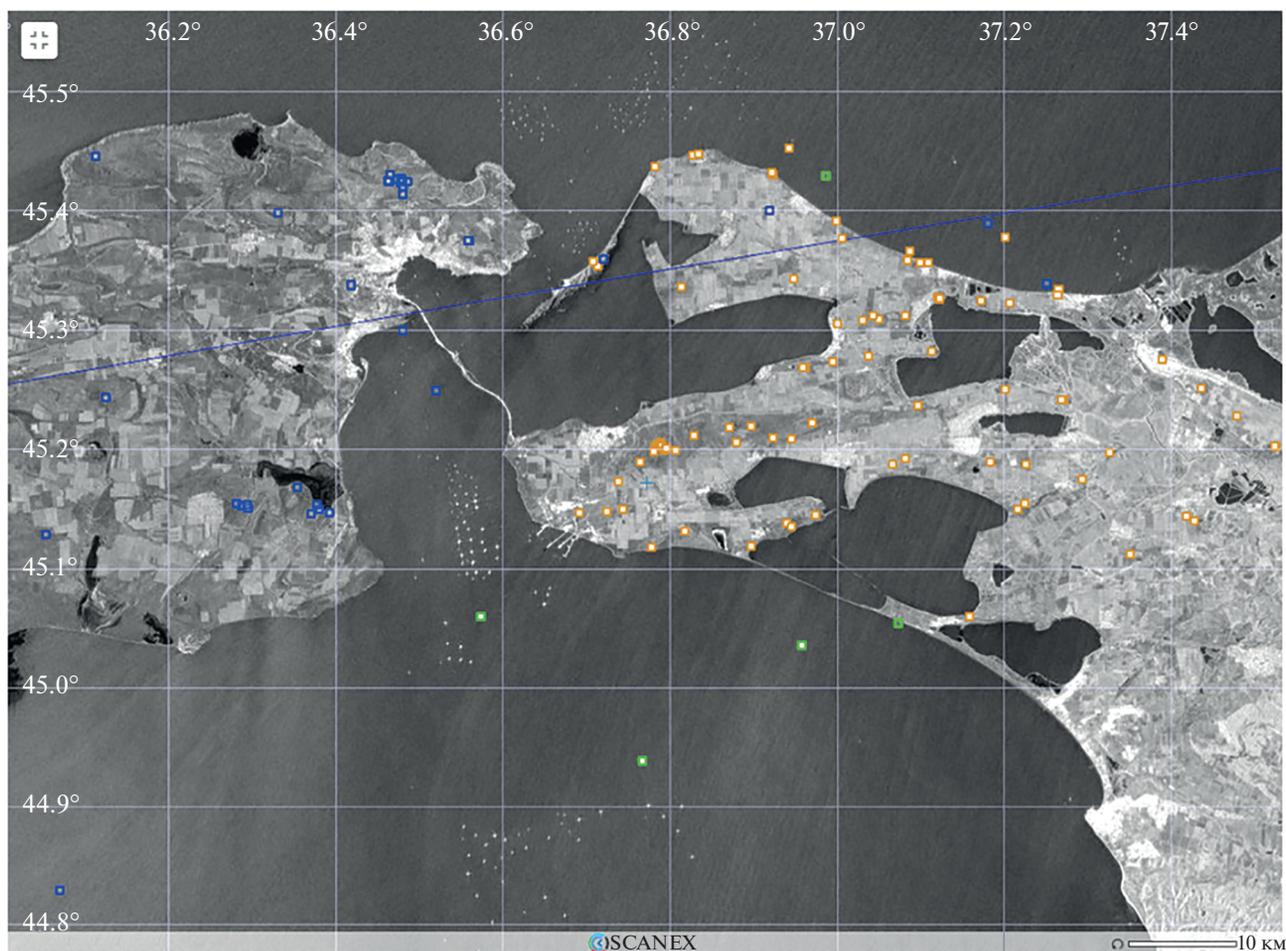
В ходе мониторинга выявленная тенденция снижения общего количества пленочных загрязнений после 2019 г. может говорить о создании более благоприятной экологической обстановки в проливе, в особенности после окончания строительства Крымского моста. Однако от года к году общая площадь загрязнений постепенно растет, более того, стали появляться пятна большой площади (более 25 км<sup>2</sup>), главным образом в черноморском предпроливье, в районе рейда в открытом море, вне территориальных вод РФ. На наш взгляд, возникает вопрос о законности этого рейда, где не действуют ограничения конвенции МАРПОЛ, а контроль российских природоохранных организаций не заметен или малоэффективен.

Что касается типов продуктов, образующих разливы, то вполне очевидно предположить, что на РПР в воду попадают нефтепродукты и масла, перевозимые наливом; у причалов ПК «Тамань» — как остатки масложировой продукции, так и судовые отходы с нефтепродуктами; на судовых трассах и рейдовых/якорных стоянках — самые разнообразные судовые отходы (балластные/промывочные/ляльные воды, отработка, прочие жид-

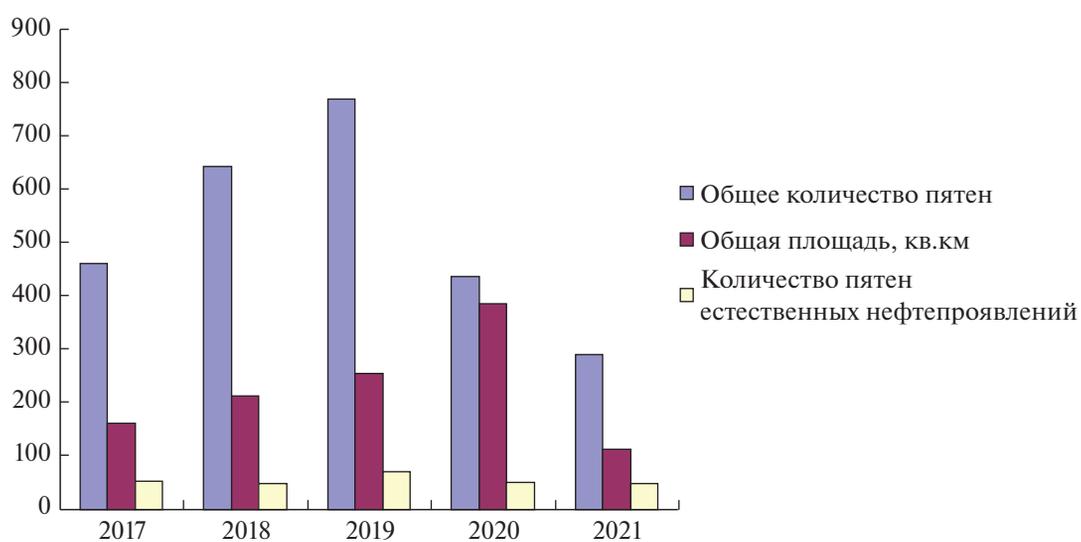
кие отходы, содержащие нефтепродукты, масла и жиры).

Помимо этого, впервые обнаружены источники естественных нефтепроявлений в черноморском предпроливье, которые суть явления природы, что создают свой нефтеуглеродный фон, который необходимо учитывать в общих оценках наряду с остальными источниками. Предварительный анализ показал, что их существование не противоречит современным геолого-геофизическим представлениям о природе Крымско-Таманского региона.

Вполне очевидно, что в начале XXI в. пролив еще раз подвергся крайне интенсивному антропогенному воздействию, которое вызвало существенное изменение всей его экосистемы. Негативное воздействие загрязнения на воды пролива в виде нефти, нефтепродуктов и прочих маслянистых веществ также очевидно. Полученные результаты позволяют сделать общий вывод о высокой степени пленочного загрязнения акватории Керченского пролива с тенденцией к стабилизации экологической обстановки. Хотя пятна пленочных загрязнений — нефте- и маслопродуктов «живут» на морской поверхности от нескольких



**Рис. 9.** Вновь обнаруженные нефтепроявления (светло-зеленый) в системе известных грязевых вулканов Тамано-Азовского региона (синий – по данным Шнюкова (2014), светло-коричневый – база данных Подымов (2015)).



**Рис. 10.** Статистика радиолокационного мониторинга пленочных загрязнений Керченского пролива и прилегающих акваторий в период с января 2017 по декабрь 2021 г.

часов до суток или, например, до смены гидрометеорологических условий, их остатки не исчезают бесследно, а накапливаются в донных осадках, воде в растворенном виде и в прибрежной зоне.

В итоге в очередной раз показана эффективность спутникового радиолокационного мониторинга для оценки экологического состояния таких акваторий с высокой антропогенной нагрузкой, каким является Керченский пролив и прилегающие акватории. С помощью радиолокационных наблюдений можно оперативно следить за факторами, вносящими загрязнения (судоходство, якорные стоянки, перегрузочные рейды, акватории портов и т.п.), а также сравнивать актуальные данные ДЗЗ с данными баз и архивов данной акватории. Более того, вполне очевидно, что постоянный спутниковый мониторинг Керченского пролива крайне необходим и должен осуществляться непрерывно, а его результаты должны быть доступны всем заинтересованным лицам и организациям.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (тема № 0128-2021-0001) и при поддержке фонда “Талант и Успех” программы Сириус-2021 “Большие вызовы”. Права копирайта на данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B принадлежат Европейскому космическому агентству (ESA). Авторы благодарят руководство ГК “СКАНЭКС” за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на базе веб-ГИС приложения “Геомиксер”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ассоциация морских торговых портов, 2021. Грузооборот морских портов России за 8 месяцев 2021 г. (<https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskikh-portov-rossii-za-8-mesyacev-2021-g>).
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Замшин В.В. Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов / Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. С. 255–271.
- Глазырин Е.А. Природное углеводородное загрязнение в черноморской прибрежной зоне Таманского полуострова / Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (“Опасные явления – III”): Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2021. С. 37–40.
- Глумов И.Ф., Гулев В.Л., Сенин Б.В., Карнаухов С.М. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон / Под ред. Б.В. Сенина. Ч. 2. М.: Недра, 2014. 181 с.
- Евтушенко Н.В. Загрязнение Керченского пролива: взгляд из космоса // Земля из космоса. 2016. № 6(22). С. 74–77.
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю., Затягалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
- Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю. и др. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62.
- Иванов А.Ю., Потанин М.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Антонюк А.Ю. Оперативный мониторинг морских акваторий: новые геоинформационные решения и интернет технологии // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2014. 2(18). С. 28–36. (<http://zikj.ru/images/archive/no18/no18-4-ivanov-rus.pdf>).
- Иванов А.Ю., Хлебников Д.В., Коновалов Б.В., Клименко С.К., Терлеева Н.В. Керченский пролив и его техногенное загрязнение: возможности оптического и радиолокационного дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 8. С. 21–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-21-27>
- ИО РАН, 2016. Загрязнение акватории Керченского пролива: взгляд из космоса (<https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/1390-zagryaznenie-akvatorii-kerchenskogo-proлива-vzglyad-iz-kosmosa>).
- ИО РАН, 2021. Пятилетний мониторинг пленочных загрязнений Керченского пролива (<https://ocean.ru/index.php/novosti-left/ob-yavleniya/item/2203-pyatiletnij-monitoring-plenochnykh-zagryaznenij-kerchenskogo-proлива>).
- Кудрик И.Д., Портной В.С. Негативные антропогенные факторы, влияющие на состояние экосистемы Керченского пролива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 271–275.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
- МАРПОЛ, 2008. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). Кн. I и II. СПб. ЗАО “ЦНИИМФ”, 2008.
- Морской порт Тамань, 2021. Информация ФГБУ “АМП Черного моря” (<https://bsamp.ru/port-taman.php>).
- Подымов И. 2015. Исследование и мониторинг грязевого вулканизма Тамани в аспекте современной проблемы экологической безопасности Азово-Черноморского побережья России (<https://mud-volcano.coast-dyn.ru/map.html>).
- СКАНЭКС, 2019а. Дноуглубительные работы у порта Тамань в Керченском предпроливье: результаты на-

блюдения из космоса (<http://www.scanex.ru/company/news/dnougubitelnye-raboty-u-porta-taman-v-kerchenskom-predprolive-rezultaty-nablyudeniya-iz-kosmosa/>) СКАНЭКС, 2019б. У Крымского моста обнаружены пятна пленочных загрязнений (<http://www.scanex.ru/company/news/u-krymskogo-mosta-obnaruzheny-pyatna-plenochnykh-zagryazneniy/>).

СКАНЭКС, 2019с. В 2019 г. зафиксирована тенденция к увеличению пленочными загрязнениями Керченского пролива (<http://scanex.ru/company/news/v-2019-godu-zafiksirovana-tendentsiya-k-velicheniyu-plenochnymi-zagryazneniyami-kerchenskogo-proliv/>).

СКАНЭКС, 2020а. В Азовском море обнаружен подводный источник нефтеуглеводородов ([https://www.scanex.ru/company/news/v-azovskom-more-obnaruzhen-podvodnyy-istochnik-nefteuglevodorodov/?sphrase\\_id=21204&sphrase\\_id=21204](https://www.scanex.ru/company/news/v-azovskom-more-obnaruzhen-podvodnyy-istochnik-nefteuglevodorodov/?sphrase_id=21204&sphrase_id=21204)).

СКАНЭКС, 2020б. В северо-восточной части Черного моря обнаружен новый источник пленочных загрязнений ([https://www.scanex.ru/company/news/v-severo-vostochnoy-chasti-chyernogo-morya-obnaruzhen-novyy-istochnik-plenochnykh-zagryazneniy/?sphrase\\_id=21205&sphrase\\_id=21205](https://www.scanex.ru/company/news/v-severo-vostochnoy-chasti-chyernogo-morya-obnaruzhen-novyy-istochnik-plenochnykh-zagryazneniy/?sphrase_id=21205&sphrase_id=21205)).

Терлеева Н.В., Иванов А.Ю. Жидкие судовые грузы и отходы, причины появления судовых разливов в море и проблемы их дистанционного зондирования // Эко-

логия и промышленность России. 2017. Т. 21. № 8. С. 13–19.

Фащук Д.Я., Петренко О.А. Керченский пролив – важнейшая транспортная артерия и рыбопромысловый район Азово-Черноморского бассейна // Юг России: экология, развитие. 2008. № 1. С. 16–24.

Шнюков Е.Ф. Грязевые вулканы Черного моря (каталог). Киев: ГНУ ОМГОР, 2014. 259 с.

Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Атлас. Киев: Наукова Думка, 1986. 152 с.

Alpers W., Espedal H.A. Oils and surfactants. In: Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, 2004 ([http://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOASARManual\\_CH11\\_pg263-276.pdf](http://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOASARManual_CH11_pg263-276.pdf)).

Alpers W., Holt B., Zeng K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // Remote Sens. Environ. 2017. 20. P. 133–147.

Ivanov A. Yu. Remote sensing of oil films in the context of global changes / In: "Remote Sensing of the Changing Oceans". Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2011. P. 169–194.

Ivanov A. Yu., Zatyagalova V.V. A GIS approach to mapping oil spills in a marine environment // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29. № 21. P. 6297–6313.

## Oil Pollution of the Kerch Strait Based on Five-Year Monitoring with SAR: Current Status and Main Sources

S. K. Klimenko<sup>1</sup>, A. Yu. Ivanov<sup>1, 2</sup>, and N. V. Terleeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

The results of the five-year (2017–2021) monitoring of the oil pollution of the Kerch Strait and its pre-straits are analyzed. The synthetic aperture radar (SAR) images of the European Sentinel-1A and Sentinel-1B satellites, both operational and archived, were used for detection, monitoring and study the sources of oil pollution by observing their slicks on the sea surface. During the monitoring 2597 oil slicks with a total area of 1120 km<sup>2</sup> were detected on 481 SAR images. The main sources of pollution have been identified; they are roadstead transshipment areas in the strait and pre-strait, the port of Taman with its berthing complex and anchorages in the Azov and Black Seas. In addition, natural oil seeping in the adjacent Black Sea shelf was discovered that create own natural oil-carbon background. Based on monitoring results, a tendency towards an overall decrease for spills was revealed, despite their growth in 2016–2019. Monitoring with SAR using the geoinformation approach has shown its high efficiency, especially for oil spill detection and identification their sources.

*Keywords:* Kerch Strait, oil pollution, spaceborne SAR, satellite monitoring, pollution sources

### REFERENCES

Associaciya morskikh torgovykh portov, 2021. Gruzooborot morskikh portov Rossii za 8 mesyacev 2021. (In Russian) URL: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskikh-portov-rossii-za-8-mesyacev-2021-g>

Bondur V.G. Aerokosmicheskie metody i tekhnologii monitoringa neftegazonosnykh territorij i ob"ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace methods and technologies for mon-

itoring of oil and gas areas and facilities] // Issled. Zemli iz Kosmosa. 2010. № 6. P. 3–17. (In Russian)

Bondur V.G., Zamshin V.V. Kosmicheskiy radiolokatsionnyy monitoring morskikh akvatoriy v rayonakh dobychi i transportirovki uglevodorodov [Space radar monitoring of offshore regions in the areas of hydrocarbon production and transportation] / "Aerospace monitoring of oil-and-gas facilities". Ed. V.G. Bondura. Moscow: Scientific World, 2012. P. 255–271. (In Russian)

- Glazyrin E.A.* Prirodnoye uglevodородnoye zagryazneniye pribrezhnoy zony Chernogo morya Tamanskogo poluostrova [Natural hydrocarbon pollution of the Black Sea coastal zone of the Taman Peninsula] / in *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnyuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov* ("Opasnyye yavleniya – III"). Rostov-na-Donu: Izd-vo YUNTS RAN, 2021. P. 37–40.
- Glumov I.F., Gulev V.L., Senin B.V., Karnauhov S.M.* Regional'naya geologiya i perspektivy neftegazonosnosti Chernomorskoj glubokovodnoj vpadiny i priliegayushchih shel'fovyh zon [Regional geology and prospects for oil and gas potential of the Black Sea deep-water basin and adjacent shelf zones]. Ed. B.V. Senin. Ch. 2. Moscow: Nedra, 2014. 181 p. (In Russian).
- Evtushenko N.V.* Zagryaznenie Kerchenskogo proliva: vzglyad iz kosmosa [Pollution of the Kerch Strait: a view from space] // *Zemlya iz Kosmosa*. 2016. № 6(22). P. 74–77. (In Russian)
- Ivanov A. Yu.* Sliki i plenochnye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyah [Slicks and film formations in space radar images] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 3. P. 73–96. (In Russian)
- Ivanov A. Yu., Zatyagalova V.V.* Kartografirovaniye plenochnykh zagryazneniy morya s ispol'zovaniyem kosmicheskoy radiolokatsii i geograficheskikh informatsionnykh sistem [Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 6. P. 46–63. (In Russian)
- Ivanov A. Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A. Yu. et al.* Poisk i obnaruzhenie estestvennykh nefteproyavleniy v moryakh Rossii po dannym kosmicheskoy radiolokatsii [Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 5. P. 43–62. (In Russian)  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
- Ivanov A. Yu., Potanin M. Yu., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Antonyuk A. Yu.* Operativnyy monitoring morskikh akvatorij: novye geoinformatsionnye resheniya i internet tekhnologii [Operational monitoring of marine areas: new geoinformation solutions and internet technologies] // *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnyye resheniya*. 2014. 2(18). P. 28–36. (In Russian)
- Ivanov A., Khlebnikov D., Kononov B., Klimenko S., Terleeva N.* Kerchenskij proliv i ego tekhnogennoe zagryaznenie: vozmozhnosti opticheskogo i radiolokatsionnogo distantsionnogo zondirovaniya [Kerch Strait and its technogenic pollution: possibilities of optical and radar remote sensing] // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. 25(8). P. 21–27. (In Russian)
- IO RAS, 2016. Pollution of the Kerch Strait water area: a view from space. (In Russian)  
URL: <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/1390-zagryaznenie-akvatorii-kerchenskogo-proliva-vzglyad-iz-kosmosa>.
- IO RAS, 2021. Five-year monitoring of oil pollution of the Kerch Strait. (In Russian)  
URL: <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/ob-yavleniya/item/2203-pyatiletnij-monitoring-plenochnykh-zagryaznenij-kerchenskogo-proliva>.
- Kudrik I.D., Portnoj V.S.* Negativnyye antropogennyye faktory, vliyayushchie na sostoyanie ekosistemy Kerchenskogo proliva [Negative anthropogenic factors affecting the state of the Kerch Strait ecosystem] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. 2013. № 27. P. 271–275. (In Russian)
- Lavrova O. Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A. et al.* Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morej Rossii [Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas]. Moscow: IKI RAN, 2011. 470 p. (In Russian)
- MARPOL, 2008. Mezhdunarodnaya Konvenciya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov 1973 g., izmenennaya protokolom 1978 k nej (MARPOL-73/78). [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78] Kn. I i II. St. Petersburg: ZAO "CNIIMF", 2008. (In Russian)
- Morskoy port Taman, 2021. Informatsiya FGBU "AMP Chernogo morya". (In Russian)  
URL: <https://bsamp.ru/port-taman.php>.
- Podymov I.* 2015. Issledovanie i monitoring gryazevogo vulkanizma Tamani v aspekte sovremennoy problemy ekologicheskoy bezopasnosti Azovo-Chernomorskogo poberezh'ya Rossii [Research and monitoring of mud volcanism in Taman in the aspect of the current problem of environmental safety of the Azov-Black Sea coast of Russia]. (In Russian)  
URL: <https://mud-volcano.coastdyn.ru/map.html>.
- SCANEX, 2019a. Spots of oil pollution were found near the Crimean bridge. (In Russian)  
URL: <http://www.scanex.ru/company/news/u-krymskogo-mosta-obnaruzheny-pyatna-plenochnykh-zagryazneniy/>.
- SCANEX, 2019b. In 2019 a trend towards an increase in oil pollution in the Kerch Strait was recorded. (In Russian)  
URL: <http://scanex.ru/company/news/v-2019-godu-zafiksirovana-tendentsiya-k-uvlicheniyu-plenochnyimi-zagryazneniyami-kerchenskogo-proliv/>.
- SCANEX, 2019c. Dredging near the port of Taman in the Kerch fore-Strait: results of observations from space. (In Russian)  
URL: <http://www.scanex.ru/company/news/dnouglobitelnye-raboty-u-porta-taman-v-kerchenskom-predprolive-resultaty-nablyudeniya-iz-kosmosa/>.
- SCANEX, 2020a. Underwater source of petroleum hydrocarbons discovered in the Sea of Azov. (In Russian)  
URL: [https://www.scanex.ru/company/news/v-azovskom-more-obnaruzhen-podvodnyy-istochnik-nefteuglevodorodov/?sphrase\\_id=21204&sphrase\\_id=21204](https://www.scanex.ru/company/news/v-azovskom-more-obnaruzhen-podvodnyy-istochnik-nefteuglevodorodov/?sphrase_id=21204&sphrase_id=21204).
- SCANEX, 2020b. A new source of oil pollution discovered in the northeastern part of the Black Sea. (In Russian)  
URL: [https://www.scanex.ru/company/news/v-severovostochnoy-chasti-chyernogo-morya-obnaruzhen-novyy-istochnik-plenochnykh-zagryazneniy/?sphrase\\_id=21205&sphrase\\_id=21205](https://www.scanex.ru/company/news/v-severovostochnoy-chasti-chyernogo-morya-obnaruzhen-novyy-istochnik-plenochnykh-zagryazneniy/?sphrase_id=21205&sphrase_id=21205).
- Terleeva N., Ivanov A.* Zhidkie sudovye gruzy i othody, prichiny poyavleniya sudovyh razlivov v more i problemy ih distantsionnogo zondirovaniya [Liquid cargo and waste, reasons of ship-made oil spills in the sea and problems of their remote sensing] // *Ecology and Industry of Russia*. 2017. 21(8). P. 13–19. (In Russian)
- Faschuk D. Y., Petrenko O.A.* Kerchenskij proliv – vazhnishaya transportnaya arteriya i rybopromyslovyy rajon Azovo-Chernomorskogo bassejna [Kerch strait – the major transport artery and a fishing area of the Azov-Black Sea

- basin] // South of Russia: Ecology, Development. 2008. 3(1). P. 16–24. (In Russian)
- Shnyukov E.F.* Gryazeveye vulkany Chernogo morya (katalog) [Mud volcanoes of the Black Sea (Catalog)]. Kiev: GNU OMGOR, 2014. 259 p. (In Russian).
- Shnyukov E.F., Sobolevsky Yu.V., Gnatenko G.I. et al.* Gryazeveye vulkani Kerchensko-Tamanskoi oblasti. Atlas. [Mud volcanoes of the Kerch-Taman region. Atlas]. Kiev: Naukova Dumka, 1986. 152 p. (In Russian).
- Alpers W., Espedal H.A.* Oils and surfactants. In: Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, 2004
- URL: [http://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOAASARManual\\_CH11\\_pg263-276.pdf](http://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOAASARManual_CH11_pg263-276.pdf).
- Alpers W., Holt B., Zeng K.* Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // Remote Sens. Environ. 2017. 20. P. 133–147.
- Ivanov A. Yu.* Remote sensing of oil films in the context of global changes / In: "Remote Sensing of the Changing Oceans". Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2011. P. 169–194.
- Ivanov A. Yu., Zatyagalova V.V.* A GIS approach to mapping oil spills in a marine environment // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29. № 21. P. 6297–6313.

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CHAMP**© 2022 г. Д. Ю. Абрамова<sup>а</sup>, Л. М. Абрамова<sup>б</sup>, \*, И. М. Варенцов<sup>б</sup><sup>а</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Москва, Троицк, Россия<sup>б</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
Москва, Троицк, Россия

\*E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 29.08.2021 г.

Исследуется распределение литосферных магнитных аномалий над территорией Тибетско-Гималайского нагорья, Западного и Восточного Гималайских синтаксисов, а также части полуострова Индостан, полученных из измерений на германском спутнике Земли CHAMP в разные годы его миссии. Приведены карты литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора  $T_a$  и горизонтальной компоненты  $X_a$  на разных уровнях полета спутника. Рассмотрено соответствие карт литосферных магнитных аномалий региональной геолого-тектонической обстановке и региональной геофизике. Объяснено изменение знака аномального магнитного поля над северной частью Индийской плиты как возможное последствие мантийного прогрева, подъема изотермы Кюри и потери исходной намагниченности низов земной коры. Сделано сравнение серии разноуровневых карт магнитных аномалий между собой, оценена степень их подобия. Для иллюстрации целесообразности выделения литосферных магнитных аномалий непосредственно из спутниковых измерений и демонстрации различия карт литосферных и приповерхностных аномалий, построена карта  $T_a$  по материалам базы данных EMAG2 модели WDMAM на высоте 4 км. Результаты работы показывают, что выделенные магнитные аномалии над областью Индо-Азиатской коллизии адекватно согласуются с имеющимися региональными геолого-тектоническими и геофизическими условиями.

*Ключевые слова:* литосферные магнитные аномалии, спутниковые измерения, Индо-азиатская зона коллизии, субдукция Индийской плиты, Тибет, Гималаи

DOI: 10.31857/S0205961422030022

**ВВЕДЕНИЕ**

Тектоносфера Земли состоит из блоков различных размеров и форм, окруженных зонами пониженной вязкости субстрата. Положение таких блоков в нижних частях земной коры очень часто не согласуется с видимыми на дневной поверхности геологическими структурами. Поэтому очень важной проблемой современной геологии является изучение генетических связей между поверхностными тектоническими структурами и структурами нижних слоев земной коры и верхней мантии, а также их взаимодействие.

В процессе построения прогностических комплексов карт скрытых месторождений необходимо глубинное картирование неоднородностей коры и верхней мантии, которое может быть осуществлено, в основном, с использованием геофизических методов (Шукин, 2005; Нургалиев и др., 2008).

Неоднородности литосферы на различных ее глубинных уровнях проявляются на поверхности

Земли в виде разного вида магнитных аномалий. Выявление и типизация их природы является актуальной задачей геофизики, поскольку магнитное поле является параметром, отражающим протекание геолого-тектонических процессов именно в настоящее время.

Магнитное поле земной коры и литосферы, в целом, индуцируется входящими в их состав намагниченными минералами, что позволяет использовать его как дополнительный параметр при определении структуры и состава земной коры в процессе изучения региональной тектоники (Nemant, Maus, 2005; Nemant et al., 2005).

Литосферные магнитные аномалии (ЛМА) генерируются как индуцированной, так и остаточной намагниченностью. На континентах их источником, в основном, является намагниченность индуцированная. Лабораторные и теоретические исследования показали, что в нижней коре, являющейся предметом изучения в настоящей

работе, остаточная намагниченность намного меньше индуцированной (Treloar et al., 1986) и, как правило, игнорируется при исследованиях магнитных аномалий континентальной коры (Nemant et al.; 2005; Nemant, Mitchell, 2009). Таким образом, при анализе магнитных аномалий мы постулируем, что нижняя кора изучаемых территорий имеет индуцированную намагниченность.

Исследования ЛМА показывают, что их источники являются по происхождению геологическими и лежат в литосфере Земли. Однако в некоторых регионах земного шара встречаются несоответствия между предсказанными и наблюдаемыми аномалиями, особенно при изучении древних дорифейских областей, погруженных под молодые платформы или осадочные слои, а также при исследованиях свойств земной коры в труднодоступных полярных и горных областях.

Эти проблемы помогает решать магнитная съемка, осуществляемая низколетящими околоземными спутниками, которая на сегодняшний день является наиболее дешевым и доступным геофизическим методом изучения глубинного строения нашей планеты. К настоящему времени спутниковые измерения позволили покрыть практически всю поверхность Земли достаточно равномерной сетью данных о геомагнитном поле и являются неоценимыми и незаменимыми источниками для получения такой информации.

Спутник CHAMP, материалы которого авторы постоянно используют для исследований аномального магнитного литосферного поля, завершил свою миссию, сгорев в атмосфере над Охотским морем 19 сентября 2010 г. после 10 лет, 2 мес. и 4 дней работы на орбите. Аппарат был спроектирован для измерения гравиметрического и магнитного полей Земли и оптического зондирования атмосферы. Можно с уверенностью утверждать, что CHAMP был одним из самых успешных и надежных проектов последних десятилетий, использовавшихся для получения новой информации о геофизических полях Земли. Его миссия показала, что спутниковые измерения остаются необходимыми и приоритетными при изучении магнитного поля Земли.

Развиваемые нами технологии выделения литосферной части из измеренного спутниковыми магнитометрами суммарного магнитного поля, позволяют использовать эти данные для адекватного определения положения региональных магнитных аномалий, обусловленных намагниченностью именно глубоко погруженных слоев земной литосферы (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014; Абрамова и др. 2020а, 2020б, 2020в).

Структура и тектоника региона Индо-Азиатской коллизии обусловлены взаимодействием

трех тектонических плит: Тихоокеанской, Индийской и плиты Филиппинского моря. С востока Тихоокеанская и Филиппинская плиты субдуцируют под Евразийскую плиту, а с юго-запада погружение Индийской плиты под Евразию (Индо-Азиатская коллизия) приводит к сокращению и поднятию Тибетского плато. В последнем случае это является причиной образования мощных горных систем, таких как Гималаи, Памир и Гиндукуш. Граница погружения Индийской плиты постепенно продвигается к северу, и ее северный край в настоящее время достигает блока Квантанг (Huang, Zhao, 2006).

Этой территории присущи очень сложная поверхностная топография, активные деформации земной коры (Wang et al., 2001) и мощная сейсмическая и вулканическая активность, сопровождаемая катастрофическими землетрясениями.

Геолого-тектонические процессы, связанные с погружением Индийской плиты под Тибетское плато давно привлекают огромное внимание ученых всего мира, они активно исследуются разными геологическими и геофизическими методами (Tapponnier et al., 1986; Molnar et al., 1987; Zhao et al., 1993; Nelson et al., 1996; Yin, Harrison, 2000).

Здесь мы приводим в качестве первого этапа результаты анализа карт литосферных магнитных аномалий над обширной территорией областей Гималаев, Тибетского нагорья и части полуострова Индостан, полученных по данным спутника CHAMP, с целью определения соотношения их размеров, границ и связи их пространственного положения с указанными тектоническими структурами.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Геомагнитное поле на спутниковых высотах является сложной функцией пространства и времени. Основная проблема при его анализе состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на входящие в него составляющие, связанные с различными физическими источниками. Измеренное поле является суперпозицией следующих составляющих:

- главного магнитного поля, генерируемого источниками магнитогидродинамической природы, расположенными в жидкой части земного ядра;
- поля литосферных магнитных аномалий, обусловленного намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу;
- внешних полей, источниками которых являются магнитосферно-ионосферные токовые системы;
- полей, обусловленных токами, возникающими в проводящих слоях земной коры и верхней мантии Земли.

Для выделения части, связанной с полем литосферных магнитных аномалий, нам необходимо исключить из измеренных значений все остальные составляющие, по возможности максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей. Такой подход к выделению литосферных данных, ставший классическим, усовершенствован авторами настоящей работы в части удаления из суммарного поля составляющей главного магнитного поля.

При решении такого рода задач общепринятым является представление главного магнитного поля международной аналитической моделью (IGRF), в основе которой лежит сферический гармонический анализ (СГА) среднегодовых значений геомагнитного поля. В этом случае для построения точной пространственной модели поля принципиальное значение имеет равномерное заполнение данными узлов расчетной сетки.

Однако, удачно заданные специальным образом параметры орбиты спутника *СНАМР* позволяют получать измерения геомагнитного поля ежесуточно с секундным разрешением в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли. Это дает возможность с помощью разложения компонент поля, полученных в течение суток, по сферическим гармоникам до степени и порядка  $n = m = 14$ , построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля для каждого конкретного дня, а не усредненную за длительный (годовой) интервал времени (Головков, и др., 2007). При этом для построения модели берутся все данные за сутки, включая полученные в области высоких широт, что значительно повышает равномерность покрытия сферы исходными данными. Далее, по полученным коэффициентам ССГМ главного поля на каждые конкретные сутки, синтезируются модельные значения, которые и используются для удаления соответствующей компоненты из измеренных именно в эти сутки значений суммарного магнитного поля. Учитывая, что при решении задачи выделения значений аномального магнитного поля главное поле Земли рассматривается как постоянная составляющая для конкретного промежутка времени, удаляемая из измеренных значений, использование коэффициентов ССГМ для синтеза значений главного поля в каждые конкретные сутки представляется предпочтительным. Существенным преимуществом ССГМ является универсальность расчета и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных.

Для редукции вклада внешнего электромагнитного поля, которое обычно аппроксимируется первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении для магнитосферных

токовых систем и линейными или параболическими трендами для ионосферных, нами применен упрощенный подход, заключающийся в тщательном отборе экспериментальных данных. Для анализа использованы измерения поля только для витков, совершаемых спутником в ночное время (от 22.00 до 6.00 ч локального времени) и только в спокойные в магнитном отношении дни (индексы магнитной активности  $k_p \leq 1$  и  $D_{st} \leq 10$ ). Проведенные нами оценки показали, что данный подход не приводит к понижению точности определения значений аномального поля и значительно сокращает время обработки.

По разработанным авторами методикам из данных измерений суммарного геомагнитного поля на спутнике *СНАМР* выделены параметры аномального литосферного поля над территорией Индо-Азиатской коллизии, сформирована обширная база данных этих параметров и построены карты модуля полного вектора  $T_a$  и горизонтальной компоненты  $X_a$  разных масштабов и для различных альтитуд спутника *СНАМР*.

Для проверки надежности построений карт магнитных аномалий расчет всегда производился по нескольким независимым наборам спутниковых данных, либо для разных компонент магнитного поля. Сравнение полученных вариантов подтвердило, что структура магнитных аномалий воспроизводится стабильно, свидетельствуя об адекватности построенного пространственного распределения поля.

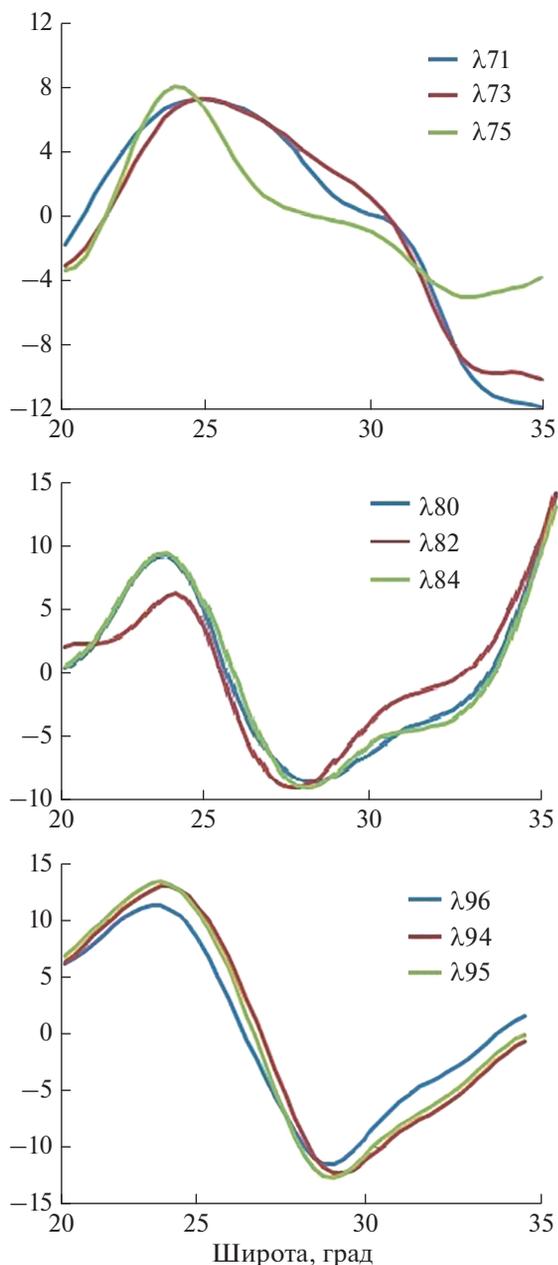
Детальность построения карт аномального литосферного поля соответствует масштабу основных тектонических структур региона.

Для построения карт аномалий над исследуемой территорией в базе данных имеется по  $\sim 12$  тыс. измерений каждой компоненты поля. Пример изменения выделенного аномального поля вдоль отдельных витков спутника *СНАМР* показан на рис. 1 для трех отдельных участков территории Индо-Азиатской коллизии: Западного Гималайского синтаксиса (ЗГС), (вверху), Центральной части погружающейся плиты, (в центре), и Восточного Гималайского синтаксиса (ВГС), (внизу).

**Примечание.** Синтаксис (от греч. Syntaxis) – построение, порядок – резкое сокращение ширины складчатого пояса, отдельного орогена или складчатой зоны, сопровождающееся увеличением горизонтального сжатия.

## АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ

Здесь мы представляем предварительные результаты построения мелкомасштабных карт литосферных магнитных аномалий, отражающих в магнитном поле последствия геолого-тектониче-



**Рис. 1.** Пример изменения аномального литосферного магнитного поля  $T_a$  вдоль витков спутника CHAMP над территорией Индо-Азиатской коллизии; параметры кривых –  $\lambda$  (долгота, градусы), вертикальная шкала – нТл.

ских процессов, сопровождающих движение Индийской плиты на северо-восток под Евразийский континент.

На рис. 2 приведены карты аномалий модуля полного вектора  $T_a$  (вверху) и горизонтальной компоненты  $X_a$  (внизу) на уровне 260 км над этой областью в последние месяцы жизни спутника CHAMP. Карты построены на планшете с координатами  $68^\circ$ – $100^\circ$  в.д. и  $20^\circ$ – $36^\circ$  с.ш. При по-

строении этих и других приводимых в работе карт использовано медианное осреднение по блокам размером  $80 \times 80$  км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Рисунки иллюстрируют хорошее подобие аномалий  $T_a$  и  $X_a$ , что является свидетельством высокого качества спутниковых данных и надежности применяемой методики обработки параметров магнитных компонент.

Обширная, занимающая значительную часть планшета, и достаточно однородная при использованных параметрах осреднения положительная ЛМА фиксируется на юге и юго-западе региона, географически она приурочена к погружающейся под Евразию Индийской плите (IP).

Индийская плита постепенно движется к северо-востоку, погружаясь под Тибет под небольшим углом до глубин 200–300 км, а ее северный край уже достиг блока Квантанг (QB) (Huang, Zhao, 2006).

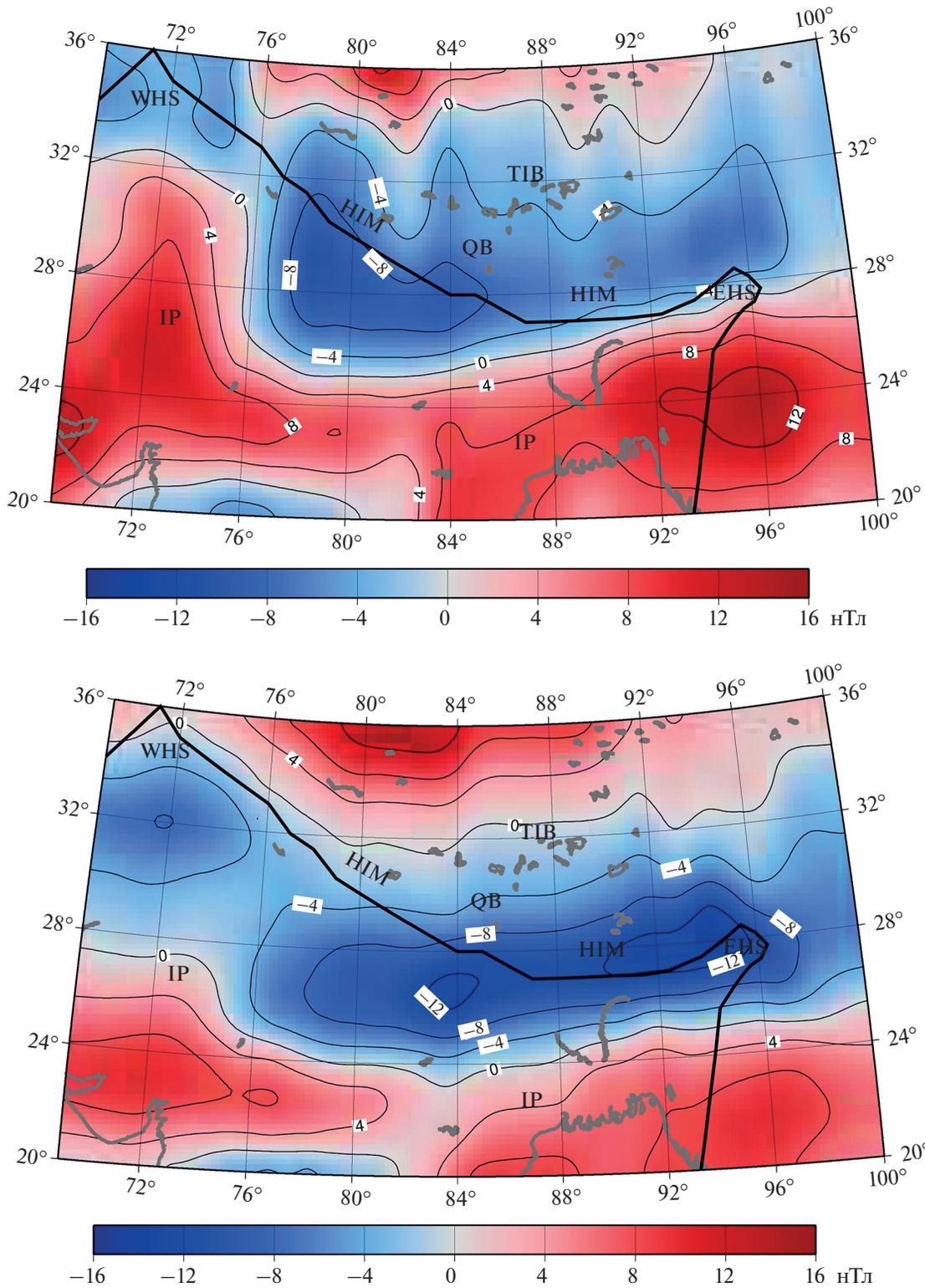
Интенсивность ЛМА превышает 12 нТл, что свидетельствует о значительной намагниченности и однородности магнитоактивного слоя нижней части земной коры этой тектонической структуры.

Однако если рассматривать территорию Индийской плиты в целом, то положительное аномальное поле присуще только южной и юго-западной частям субдуцирующей Индийской плиты, граница которой показана на рис. 2 черной жирной линией. Над северной ее частью происходит смена знака аномального поля с положительного на отрицательное значение.

Объяснение этой трансформации состоит в следующем. Согласно имеющимся результатам исследований предполагается, что в верхней мантии над погружающейся частью Индийской плиты образуется крупный мантийный клин. Вследствие этого горячий мантийный поток, а также поток флюидов, образующихся при глубинной дегидратации погружающейся части, вызывают подъем горячего астеносферного материала, что приводит к утонению литосферы под этой территорией (Huang, Zhao, 2006). При этом возникают значительные аномалии геофизических полей: повышенные сейсмические скорости, высокие значения теплового потока, аномалии электропроводности литосферы и магнитного поля.

Повышенный тепловой поток вызывает прогрев нижней коры до температуры  $\sim 580^\circ$ , так называемой точки Кюри магнетита, когда исчезают его магнитные свойства (Loves, 2007).

На широтах порядка  $24^\circ$ – $28^\circ$  с.ш. (см. рис. 2) отчетливо наблюдается линейная зона высокого градиента магнитного поля. К югу от нее находится область со значительной исходной намагниченностью нижней коры, а при погружении



**Рис. 2.** Карты компонент ЛМА над Индо-Азиатской коллизией на высоте ~260 км,  $T_d$  сверху,  $X_d$  внизу. Аббревиатуры: IP – Индийская плита, HIM – Гималаи, TIB – Тибет, QB – Квантангский блок, WHS – Западный Гималайский синтаксис, EHS – Восточный Гималайский синтаксис. Черная жирная линия показывает границы субдицирующей Индийской плиты.

плиты к северу происходит ее прогрев, подъем поверхности Кюри и потеря магнитных свойств. Зона высокого градиента магнитного поля, разделяющая положительную и отрицательную части аномалий, является как бы индикатором разности температур в нижней части земной коры: выше и ниже 580°C.

Самое обширное пространство на картах занимает отрицательная ЛМА над территорией Тибета и окружающими его областями. Тектоносфера Тибето-Гималайского орогена, сложившаяся в результате сложных глобальных тектонических процессов, характеризуется существенной пространственной неоднородностью и рядом ярких аномалий геофизических полей. Здесь происходит прогрев литосферы, подъем поверхности Кюри и потеря магнитных свойств минералов, слагающих нижнюю часть земной коры

На северо-западной оконечности зоны субдукции расположен Западный Гималайский синтаксис (WHS на рис. 2), называемый также Памирским выступом, который является границей столкновения Индийской и Евразийской плит. Западный Гималайский синтаксис и прилегающие к нему области являются сложно построенными тектоническими структурами и характеризуются аномальными геофизическими полями (Lei et al., 2002; Tiwari et al., 2009; Yang et al., 2009; Negredo et al., 2007; Sobel et al., 2011). Западный Гималайский синтаксис и его окружение — одна из самых активных областей с мощной сейсмичностью с глубокими (более чем 100 км) эпицентрами землетрясений (Koulakov, Sobolev, 2006; Mechie et al., 2012).

Литосферное магнитное поле в этой области показывает отчетливую отрицательную аномалию над Западным Гималайским синтаксисом и севернее него, что свидетельствует о потере магнитных свойств нижней части земной коры вследствие активных корово-мантийных тектонических процессов, происходящих под ней.

Не менее важно для понимания процессов субдукции Индийской плиты и активное исследование тектонических деформаций Восточного Гималайского синтаксиса (EHS), восточной окраины Тибетского плато.

Для этой области также свойственны катастрофические землетрясения на этой густонаселенной территории Китая, уносящие тысячи человеческих жизней. Здесь наблюдается крупномасштабное движение поверхностных структур, которые активно изучаются различными методами геологии и геофизики (Royden et al., 1997; Yin, Harrison, 2000; Taronnier et al., 2001; Vai et al., 2010), однако природа деформации геологических структур на больших глубинах пока далека от решения. В свете этого образы глубинных структур, отражаемые литосферными магнитными

аномалиями, могут успешно использоваться для определения положения и степени активности мантийных потоков в области восточного Тибета.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА СПУТНИКА

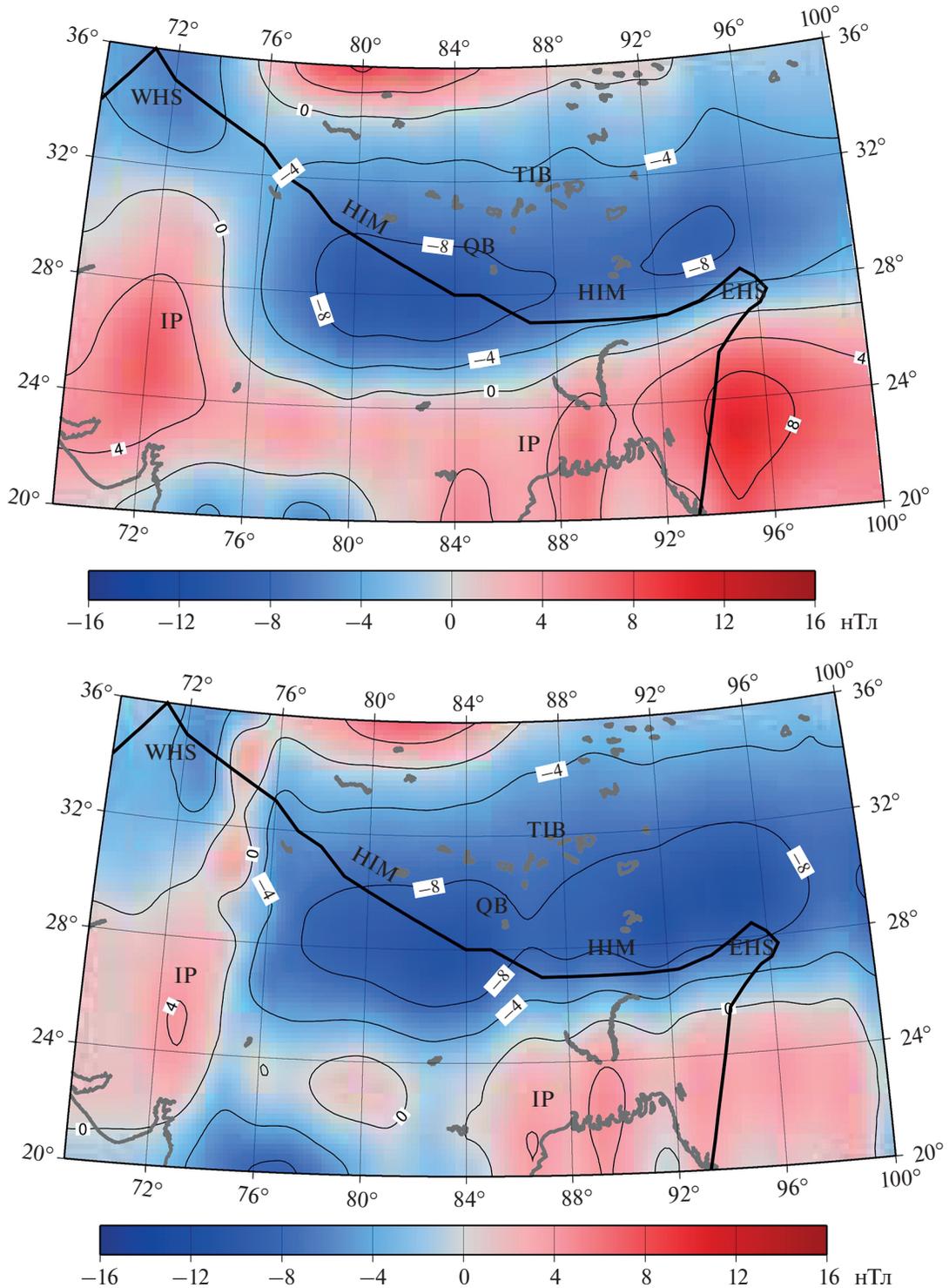
Вследствие торможения в атмосфере Земли спутника СНАМР и его постепенного снижения, измерения магнитного поля на нем проводились на разных уровнях над поверхностью планеты, что предоставляет возможность рассмотреть изменение магнитных аномалий над территорией Индо-Азиатской коллизии в зависимости от высоты наблюдения.

С этой целью совместно проанализированы карты литосферных аномалий на уровнях орбит спутника СНАМР в интервале 370–260 км. Построены и обсуждаются карты аномалий модуля полного вектора  $T_a$  для указанного интервала высот.

На рис. 2, вверху, и рис. 3 приведены карты магнитных аномалий  $T_a$ , построенные на одинаковых планшетах, но для разных уровней наблюдения: ~260, ~340 и ~370 км, за 2010, 2008 и 2006 гг., соответственно. Рисунки иллюстрируют изменение параметров ЛМА над Индо-Азиатской коллизией по мере удаления орбиты спутника СНАМР от поверхности Земли. Видно хорошее подобие измеренных аномалий, что подтверждает адекватность способа их выделения из суммарного магнитного поля Земли.

По мере увеличения высоты орбиты спутника, амплитуды аномалий снижаются. Например, на уровне 300 км по сравнению с 260 км, они уменьшаются более чем в полтора раза и показывают меньшую изменчивость и расчлененность аномального поля, отражающего намагниченность отдельных геологических структур. Интенсивность положительной аномалии на высоте 370 км уменьшается до единиц, что выглядит вполне реалистично, так как, кроме затухания поля при изменении расстояния от источника, происходит отражение более погруженных структур, намагниченность которых падает вследствие приближения к горячей мантии.

Анализ пространственного распределения магнитного поля показывает (Nemant, Maus, 2005; Nemant, et al., 2005; Абрамова и др., 2016; 2020с), что на спутниковых высотах высокочастотные аномалии сглаживаются, а низкочастотные региональные аномалии с размерами пространственных периодов 200–500 км (примерно эквивалентных высоте полета спутника) и интенсивностью порядка первых десятков нанотесла, остаются. Спутниковые наблюдения малочувствительны к мелкомасштабным структурам, и это позволяет надежно выделять региональные

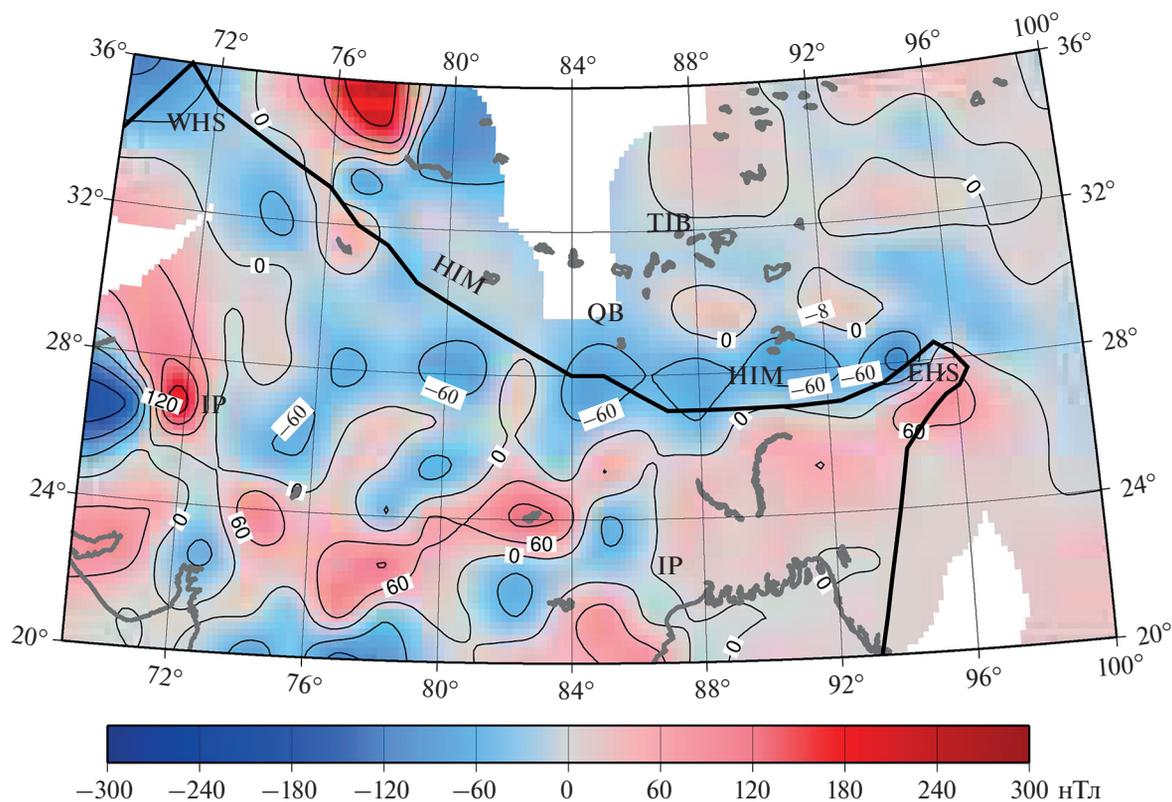


**Рис. 3.** Карты магнитных литосферных аномалий  $T_a$  на разных уровнях измерения спутником CHAMP над Индо-Азиатской коллизией: на высоте ~340 км, вверху, ~370 км, внизу. Обозначения см. на рис. 2.

литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой.

Эти положения хорошо иллюстрируются при сопоставлении карт рис. 2 и 3 с картой рис. 4. На

последнем показана карта  $T_a$  этого же региона, построенная по материалам базы данных EMAG2 модели WDMAM (World Digital Magnetic Anomaly Map), являющейся наиболее полным источни-



**Рис. 4.** Карта магнитных аномалий модуля полного вектора  $T_a$  на высоте 4 км, построенная по данным базы EMAG2 (Maus et al., 2009). Обозначения см. на рис. 2.

ком глобального распределения магнитного поля настоящее время (Maus et al., 2009). Высота над геоидом — 4 км, масштаб и осреднение данных те же, что и на рис. 2 и 3. “Белые пятна” на карте рис. 4 являются следствием ограниченности информации в данных EMAG2 для этих территорий.

Карты магнитных аномалий на высотах спутника и приземной высоте имеют совершенно разный вид. На уровне над поверхностью Земли 4 км наблюдается раздробленность поля на большое количество аномалий разного знака и размера в сравнении с полем на высоте спутника, что свидетельствует о неоднородной намагниченности верхних коровых структур. Этот факт имеет естественное объяснение: измерения магнитного поля на больших высотах работают как “фильтр низких частот”, т.е., локальные аномалии подавляются, а региональные длиннопериодные аномалии остаются в мало искаженном виде. Относительное уменьшение амплитуды аномалий с высотой зависит от параметров источников литосферных аномалий: чем больше глубина намагниченного тела и его горизонтальные размеры, тем медленнее затухают аномалии с высотой. Таким образом, в спутниковых наблюдениях сохраняются и могут быть непосредственно выделены анома-

лии, вызванные крупномасштабными структурами, залегающими на самых больших глубинах, которые как раз и являются предметом изучения и использования при региональных исследованиях.

Высота пересчета пропорциональна периоду фильтруемых аномалий, поэтому по набору карт магнитного поля, построенных по измерениям на различных высотах, можно проследить характер пространственных изменений поля и характер отражения в нем особенностей геологического строения намагниченных слоев литосферы на разных глубинах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показали, что магнитные аномалии над областью Индо-Азиатской коллизии согласуются с имеющимися региональными геолого-тектоническими и геофизическими условиями.

Показано, что область высокого градиента ЛМА между южной и северной частями Индийской плиты является индикатором положения места, где вследствие мантийных процессов разогрева астеносферы, происходит потеря магнит-

ных свойств ферромагнитных материалов, составляющих нижнюю кору Земли.

Использование разновысотных спутниковых данных открывает дополнительные возможности применения градиентных методов при изучении степени затухания поля ЛМА.

Можно сделать заключения о целесообразности использования спутникового литосферного магнитного аномального поля при изучении тектоносферы сложно построенных и геодинамически активных областей на примере Индо-Азиатской коллизии в условиях труднодоступных высокогорных регионов.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН № 0144-2019-0021 и поддержаны текущим российско-китайским грантом РФФИ № 21-55-53041.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М.* Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника CHAMP) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С. 1081–1092.
- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н.* Изменения литосферных магнитных аномалий с высотой (по данным спутника CHAMP) // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 2. С. 254–264.
- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М.* О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в исследовании геолого-тектонического строения литосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020а. № 2. С. 69–81.  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010029>
- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М.* Литосферные магнитные аномалии восточной части Северного Ледовитого океана как образы тектонических структур // Исслед. Земли из космоса. 2020б. № 6. С. 24–33.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н.* Отражение тектоники Восточной Европы в литосферных магнитных аномалиях спутниковой миссии CHAMP // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 47-й сессии Межд. научн. семинара им. Д.Г. Успенского—В.Н. Страхова. Воронеж: Научная книга. 2020в. С. 3–7.
- Головков В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А.* Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путем совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 2. С. 272–278.
- Нургалеев Д.К., Равилова Н.Н., Щукин Ю.К.* Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов // Геофизический вестник. 2008. С. 5–10.
- Щукин Ю.К.* Проблемы глубинной геологии в региональных геофизических исследованиях. Сб. Вторая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли // М.: МАКС ПРЕСС. 2005. С. 21–30.
- Bai D., Unsworth M.J., Meju M.A., Ma X., Teng J., Kong X., Sun Y., Sun J., Wang L., Jiang C., Zhao C., Xiao P., Liu M.* Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging // Nature Geoscience Lett. 2010. V. 3. P. 358–362. :  
<https://doi.org/10.1038/NGeo830SH>
- Hemant K., Maus S., Haak V.* Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.
- Hemant K., Mitchell A.* Magnetic field modeling and interpretation of the Himalayan-Tibetan Plateau and adjoining north Indian Plains // Tectonophysics. 2009. V. 487. P. 87–99.
- Hemant K., Maus S.* Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 1–23.
- Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305,  
<https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Koulakov I., Sobolev S.* A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys. J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.
- Lei J., Zhou H., Zhao D.* 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J. Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.
- Lowes F.* Geomagnetism spectrum, spatial. In: *Gubbins D, Herrero-Bervera E* (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berlin. P. 350–353.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F.* EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10 (8). Q08005.  
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S.* Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.
- Molnar P., England P., Martinod J.* Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.
- Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S.* Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043>
- Nelson K., Zhao W., Brown L.* Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. 274. P. 1684–1696.

- Royden L., Burchfiel B., King R., Wang E., Chen Z., Shen F., Liu Y. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet // *Science*. 1997. V. 276. P. 788–790.
- Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. 304: P. 369–378.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012>
- Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia // Geological Society, London. Special Publications. 1986. V. 19. P. 113–157.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07>
- Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // *Science*. 2001. V. 294. P. 1671–1677.
- Treloar N.A., Shive P.N., Fountain D.M. Viscous remanence acquisition in deep crustal rocks // *Eos Trans. AGU*. 1986. V. 67. 266 p.
- Wang, Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // *Science*. 2001. V. 294. P. 574–577.
- Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2, 2007.  
<http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X. Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis // *Progr. Geophys.* 2009. V. 24. P. 1975–1986.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2903.2009.06.007>
- Yin A., Harrison T. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. V. 28. 21 p.
- Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // *Geology*. 2004. V. 32. P. 809–812.  
<https://doi.org/10.1130/G20554.1>
- Zhao W., Nelson K., INDEPTH Project Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet // *Nature*. 1993. V. 366. P. 557–559.

## Lithospheric Magnetic Anomalies over the India-Asia Collision on Measurements of the CHAMP Satellite

D. Yu. Abramova<sup>1</sup>, L. M. Abramova<sup>2</sup>, and I. M. Varentsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

<sup>2</sup> Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

The distribution of lithospheric magnetic anomalies over the territory of the Tibetan-Himalayan highlands, the Western and Eastern Himalayan syntaxes, as well as a part of the Indian plate, obtained from measurements on the German satellite CHAMP in different years of its mission, is investigated. Maps of lithospheric magnetic anomalies for the total vector  $T_a$  and the horizontal component  $X_a$  at different levels of the satellite flight are presented. The accordance of lithospheric magnetic anomalies maps to the regional geological-tectonic setting and regional geophysics is considered. The change in the sign of the anomalous magnetic field in the northern part of the Indian plate is explained as a result of mantle heating, the rise of the Curie isotherm and the loss of the initial magnetization of the lower crust. A comparison of a series of different-level maps of magnetic anomalies with each other is made; the degree of their similarity is estimated. To illustrate the convenience and adequacy of identifying lithospheric magnetic anomalies in a pure form and to demonstrate the difference in the type of maps of lithospheric and near-surface anomalies, a map of the total vector  $T_a$  modulus was constructed and presented using the materials from the EMAG2 database of the WDMAM model at an altitude of 4 km. The results show that the identified magnetic anomalies over the India-Asia collision area are in adequate agreement with the existing regional geological-tectonic and geophysical conditions.

**Keywords:** lithospheric magnetic anomalies, satellite measurements, collisional India-Asia zone, subduction of the Indian plate, Tibet, Himalayas

### REFERENCES

- Abramova D. Yu., Abramova L.M. Litosfernyye magnitnyye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnika CHAMP) [Lithospheric magnetic anomalies in Siberia (based on measurements from the CHAMP satellite)] // *Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. P. 1081–1092. (In Russian). =
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., Varentsov I.M., Lozovskiy I.N. Transformatsiya litosfernykh magnitnykh anomalii s vysotoy (po dannym sputnika CHAMP) [Changes of lithospheric magnetic anomalies with altitude (according to the CHAMP satellite)] // *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2016. № 2. P. 254–264. (In Russian)
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. O vozmozhnostyakh ispol'zovaniya sputnikovyykh geomagnitnykh nablyudeniy v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroeniya litosfery [On the possibilities of using satellite geomagnetic observations in the study of the geological and tectonic structure] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020a. № 2. P. 69–81. (In Russian)  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010029>
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. Litosfernyye magnitnyye anomalii vostochnoy chasti Severnogo Ledovi-

- togo okeana kak obrazy tektonicheskikh struktur [Lithospheric magnetic anomalies of the eastern part of the Arctic Ocean as images of tectonic structures] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020b. № 6. P. 24–33. (In Russian)
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov I.V., Lozovsky I.N.* Otrazheniye tektoniki Vostochnoy Yevropy v litosfernykh magnitnykh anomal'yakh sputnikovoy missii CHAMP [Reflection of tectonics of Eastern Europe in lithospheric magnetic anomalies of the CHAMP satellite mission] // Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proceedings of the 47th session of Int. seminar them. D.G. Uspensky–V.N. Strakhov. Voronezh: Scientific book. 2020c. P. 3–7. (In Russian)
- Hemant K., Maus S., Haak V.* Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.
- Hemant K., Mitchell A.* Magnetic field modeling and interpretation of the Himalayan-Tibetan Plateau and adjoining north Indian Plains // Tectonophysics. 2009. V. 487. P. 87–99.
- Hemant, K., Maus, S.* Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 1–23.
- Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305.  
<https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Koulakov I., Sobolev S.* A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.
- Lei J., Zhou H., Zhao D.* 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.
- Lowes F.* Geomagnetism spectrum, spatial. In: Gubbins D, Herrero-Bervera E (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berlin. P. 350–353.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozana J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golyinsky S., Kucks R., Lu`hr H., Milligan P., Mogren S., Muller R. D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The`bault E., Caratori Tontini F.* EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10(8). Q08005.  
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S.* Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.
- Molnar P., England P., Martinod J.* Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.
- Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S.* Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043>
- Nelson K., Zhao W., Brown L.* Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. 274. P. 1684–1696.
- Nurgaliev D.K., Ravilova N.N., Shchukin Yu.K.* Izmenyayushchayasya geologicheskaya sreda: prostranstvenno-vremennyye vzaimodeystviya endogennykh i ekzogennykh protsessov [Changing geological environment: spatio-temporal interactions of endogenous and exogenous processes] // Geophysical Bulletin. 2008. P. 5–10. (In Russian)
- Shchukin Yu.K.* Problemy glubinnoy geologii v regional'nykh geofizicheskikh issledovaniyakh. [Problems of the deep geology in regional geophysical researches] // The second Russian School-Seminar on Electromagnetic Sounding of the Earth M.: MAKSPRESS. 2005. P. 21–30. (In Russian)
- Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M.* Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // Earth Planet Sci. Lett. 2011. 304: P. 369–378.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012>
- Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R.* On the mechanics of the collision between India and Asia. Geological Society, London, Special Publications. 1986. V. 19. P. 113–157.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07>
- Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y.* Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // Science. 2001. V. 294. P. 1671–1677.
- Treloar N.A., Shive P.N., Fountain D.M.* Viscous remanence acquisition in deep crustal rocks // Eos Trans. AGU. 1986. V. 67. 266 p.
- Golovkov V.P., Zvereva T.I., Chernova T.A.* Metod sozdaniya prostranstvenno-vremennoy modeli glavnogo magnitnogo polya putem sovmestnogo ispol'zovaniya metodov sfericheskogo garmonicheskogo analiza i yestestvennykh ortogonal'nykh komponent [The method of creating a space-time model of the main magnetic field by using the methods of spherical harmonic analysis and natural orthogonal components] // Geomagnetism and Aeronomy. 2007. V. 47. № 2. P. 272–278. (In Russian)
- Wang Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K.* Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // Science. 2001. V. 294. P. 574–577.
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007.  
<http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X.* Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis. Progr. Geophys. 2009. V. 24. P. 1975–1986.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2903.2009.06.007>
- Yin A., Harrison T.* Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. 21 p.
- Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y.* Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // Geology. 2004. V. 32. P. 809–812.  
<https://doi.org/10.1130/G20554.1>
- Zhao W., Nelson K., INDEPTH Project Team.* Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet // Nature. 1993. V. 366. P. 557–559.

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА  
ПРИ КАРТИРОВАНИИ РАЗНОРАНГОВЫХ РАЗЛОМОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЬЯ)**© 2022 г. Г. Н. Иванченко<sup>а</sup>, Э. М. Горбунова<sup>а, \*</sup>, А. В. Черемных<sup>б</sup><sup>а</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия<sup>б</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Поступила в редакцию 02.10.2021 г.

В работе представлены результаты линеаментного анализа Прибайкалья (юго-западная часть) с использованием методов визуального дешифрирования цифровых моделей рельефа (ЦМР), топографических карт масштаба 1 : 100000 и 1 : 25000 и формализованной (компьютерной) обработки космических снимков, ЦМР на основе программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Выполнено детальное сопоставление результатов визуального и компьютерного анализа протяженных линеаментов и статистических полей малых линеаментов цифровых изображений с особенностями разломно-блоковой структуры в пределах Прибайкалья. Показана информативность комплексирования использованных методов дистанционного зондирования района исследований при картировании разноранговых разломов на территориях, характеризующихся разной тектонической активностью. По результатам линеаментного анализа предложены способы обработки дистанционных материалов и топографических карт, позволяющие уточнять положение разноранговых разломов при геологическом картировании как геодинамически активных областей (Байкальская рифтовая система), так и относительно стабильных территорий (Сибирская платформа). Основные параметры разноранговых разломов заверены полевыми наблюдениями на ключевых участках.

*Ключевые слова:* разломные зоны, линеаменты, компьютерное дешифрирование, Байкальский рифт, розы-диаграммы, стадии формирования разломов

DOI: 10.31857/S020596142203006X

**ВВЕДЕНИЕ**

Со времен введения У. Хоббсом термина линеамент прошло уже более 100 лет, за которые анализ линейных элементов ландшафта стал важнейшим инструментом оперативного получения новых знаний о разломах и сопутствующих их формированию процессах. В настоящее время, с помощью визуального линеаментного анализа не только картируют разломы различных рангов, в том числе рудоконтролирующие и рудовмещающие (Гаврилов, 2020; Куприков, Викентьев, 2019; Миловский, Беляков, 2019 и др.), но и выделяют их зоны влияния и составляют зонно-блоковые схемы исследуемых территорий (Семинский и др., 2012). Полученные результаты применяются при реконструкции полей тектонических напряжений (Семинский, Семинский, 2016; Сим и др., 2018; Черемных и др., 2018 и др.).

В конце 80-х годов прошлого века развитие информационных технологий и увеличение объема информации вызвало необходимость компьютеризации процесса дешифрирования и интер-

претации данных дистанционного зондирования (Автоматизированный..., 1988; Короновский и др., 1986; Иванченко, 1991; Zlatopolsky, 1992). Появились работы, посвященные частичной и полной формализации процесса. Преимущества формализованного анализа заключаются в обеспечении оперативности и повторяемости результатов при изучении структурно-геологических условий. Методика может быть наиболее востребована при проведении поисковых и разведочных работ в труднодоступных и недостаточно изученных районах. В пределах относительно однородного ландшафта и при малой антропогенной нагрузке линеаментам соответствуют преимущественно активные на неотектоническом этапе разрывы, зоны повышенной трещиноватости и локализации деформаций.

Формализованное дешифрирование космоснимков с низким уровнем разрешения, которые находятся в открытом доступе, позволяет оперативно анализировать геодинамическую обстановку территории исследований на регио-

нальном уровне. Для заверки на местности результатов линеаментного анализа выбираются опорные участки, в пределах которых могут быть выполнены детальные геологические изыскания, включающие картирование основных систем трещиноватости и разрывных нарушений.

Компьютерный (формализованный) линеаментный анализ результатов мониторинга сейсмоактивных территорий по данным обработки дистанционных материалов во временной динамике с использованием программного пакета LESSA позволяет выделять геодинамические предвестники землетрясений (Бондур, Зверев, 2005; Гапонова и др., 2019; Бондур, Гапонова, 2021 и др.). В условиях платформ формализованное дешифрирование космоснимков направлено на прослеживание скрытых глубинных разломов фундамента на разных иерархических уровнях, которые в виде рассеянных зон трещиноватости транслируются через чехол на поверхность в виде линеаментов (Анисимова, Короновский, 2007; Иванченко, Горбунова, 2011).

Линеаментный анализ позволяет получать важные данные о разломах, активных на неотектоническом этапе развития территории исследований. В Прибайкалье этот этап охватывает интервал времени после эпохи пенепленизации, в результате которой сформировалась мел-палеогеновая поверхность выравнивания. Разрывные деформации, активные после этого времени, наиболее хорошо выражены в линейных элементах ландшафта, в связи с чем линеаментный анализ является эффективным инструментом их изучения.

В рамках проведенных исследований линеаментных структур юго-западной части Прибайкалья было применено формализованное (компьютерное) интерактивное дешифрирование цифровых моделей рельефа (ЦМР) и космоснимков с использованием программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) (Златопольский, 2008). На основе ЦМР анализируется рельеф, образованный на новейшем этапе (плиоцен-четвертичный). Космические снимки отражают интегральную картину структур, сформированных в процессе геологического развития региона. Синхронное дешифрирование космоснимков и ЦМР направлено на выделение в ландшафте морфоструктур разного геологического возраста, сформировавшихся под воздействием различных полей тектонических напряжений.

Цель работ заключалась в исследовании структурного рисунка области сочленения Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы и определении особенностей разноранговых разломов на основе совместного формализованного и визуального линеаментного анализа космоснимков, ЦМР и топографических карт.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследования проведены в Прибайкалье (юго-западная часть), на территории охватывающей юго-восточный край Сибирской платформы и прилегающую к нему часть Центрально-Азиатского подвижного пояса, на границе которых в кайнозойе формируется Байкальская рифтовая система. Этот район интересен тем, что в непосредственной близости расположена относительно стабильная область Сибирской плиты, ее реактивированная окраина на границе с Центрально-Азиатским подвижным поясом, и собственно неотектонически активный пояс. Именно к этой границе приурочена активная в кайнозойе рифтовая система, наиболее крупный элемент которой – Байкальский рифт расположен в юго-восточной части района исследований. Здесь, в пределах северо-западного крыла рифта, располагается Обручевская система разломов (рис. 1), которая включает достаточно хорошо изученные Ангаро-Бугульдейский (Мац и др., 2001), Приморский (Шерман, Днепровский, 1989; Лунина и др., 2002), Ольхонский по (Delvaux et al., 1997) (он же Морской по (Agar and Klitgord, 1995) разломы, а также менее известные Прихребтовый (Семиинский и др., 2012), Бугульдейский (Mats et al., 2007) и Куртунский (Черемных и др., 2018; Cheremnykh et al., 2020) дизъюнктивы. Кроме того, в пределах Сибирской платформы известны такие крупные разломы как Предбайкальский (Семиинский и др., 2012) и Жигаловский (Леви и др., 1996). Для изучения этих разноранговых и по-разному выраженных в рельефе дизъюнктивов были использованы следующие методические приемы линеаментного анализа.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Набор методов линеаментного анализа был обусловлен не только необходимостью картирования всех обозначенных выше известных разломов Прибайкалья, но и возможностью анализа по дистанционным данным ширины зоны влияния и стадии формирования каждого дизъюнктива. Для анализа линеаментных структур Прибайкалья было применено два метода: визуальное дешифрирование ЦМР и топографических карт (Черемных и др., 2018), и формализованное (компьютерное) интерактивное дешифрирование космоснимков и ЦМР с использованием программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) (Златопольский, 2008, 2020).

### *Визуальное дешифрирование*

Визуальный линеаментный анализ для территории Прибайкалья проводился многими исследователями (Кузьмин, 1995; Аржанникова, Гоф-



Рис. 1. Основные разломы района исследований.

ман, 2000; Семинский и др., 2012; Лунина, 2016; Черемных и др., 2018 и др.). Приведенные ниже исследования выполнены по методике, изложенной в работе (Черемных и др., 2018). Для выделения крупных линеаментов использовались ЦМР на основе SRTM, находящиеся в свободном доступе сети Internet и имеющие разрешение ~90 м. Линейные элементы рельефа выделялись как вытянутые в плане уступы горных хребтов, спрямленные участки речных долин и русел рек. Иногда наблюдались смещения русел рек или горных хребтов, отображающие линеаменты сдвигового кинематического типа. В результате визуального линеаментного анализа с использованием ЦМР

выделены линейные элементы ландшафта с детальностью сопоставимой с результатами анализа по топографическим картам масштаба 1 : 100000, где сплошные горизонталы проведены через 20 м. Основой для проведения анализа на детальных участках служили топографические карты масштаба 1 : 25000, как наиболее крупномасштабные доступные нам материалы. На таких картах сплошные горизонталы проведены через 5 м. Количественный характер информации о рельефе на ЦМР и топографических картах разного масштаба позволяет оценить высоту уступов или горизонтальные смещения элементов рельефа, что служит дополнительной информацией о кинема-

тическом типе разлома, отождествляемого с конкретным линеamentом. Кроме того, для выявления линеamentов, выраженных в рельефе горных стран, возможно применение количественных показателей элементов рельефа, подобно методике, изложенной в монографии Е.Я. Ранцман (1979). Ранее были выделены линейные элементы ландшафта (Черемных и др., 2018): хорошо выраженные в рельефе — тектонические уступы со значительным изменением высот, линеamentы, смещающие русла рек и временных водотоков, конусы выноса, водоразделы или хребты. Также выделялись и слабо проявленные линеamentы — линейные элементы речных долин без смещения русла или линейно вытянутые уступы, характеризующиеся небольшими, но достаточными для уверенного картирования превышениями рельефа.

Таким образом, по данным обработки ЦМР и топографических карт разного масштаба выполнено визуальное картирование линеamentов по рисунку гидросети и характеру рельефа с учетом их количественных параметров. Разномасштабные топоосновы и ЦМР позволили откартировать как крупные линеamentы, так и непротяженные линейные элементы рельефа (далее по тексту малые линеamentы), осложняющие внутреннюю структуру разломных зон и вычленяемых ими блоков. В пределах известных разломных зон зафиксированы протяженные линеamentы — магистральные сместители разломов или их сегменты. Наличие или отсутствие в пределах разломной зоны магистрального сместителя связано со стадией формирования дизъюнктива, так как любой разлом развивается последовательно на трех дизъюнктивных стадиях (Seminsky, 2012): ранней дизъюнктивной, поздней дизъюнктивной и стадии полного разрушения. На ранней дизъюнктивной стадии в разломной зоне наблюдаются лишь непротяженные разрывы, опережающие формирование основного разлома. Поздняя дизъюнктивная стадия характеризуется более протяженными разрывами — будущими сегментами магистрального сместителя разлома. Со стадией полного разрушения отождествляется формирование магистрального шва дизъюнктива. Таким образом, по результатам линеamentного анализа возможно не только картирование разрывных нарушений, но определение стадии развития наиболее крупных дизъюнктивов и оконтуривание зон их динамического влияния (Шерман и др., 1983). Последнее возможно путем дополнительных построений карт плотности линейных элементов, отождествляемых нами с ранноранговыми разрывами, генетически связанными с образованием основного разлома (структурный парагенез).

### *Компьютерное дешифрирование*

Этот вид анализа проведен с использованием программного комплекса LESSA, возможности которого детально изложены в статьях (Златопольский, 2008, 2020) и монографии (Иванченко, Горбунова, 2015). Технология позволяет автоматизировано выделять малые линеamentы и анализировать их пространственное распределение. Малые линеamentы используются для построения протяженных линеamentов. Под линеamentами понимаются ориентированные линейные элементы изображения, связанные с неоднородностями ландшафта.

Данная технология применима для разных типов изображений, включая черно-белые космоснимки, цифровые модели рельефа, лидарные съемки и геофизические поля (тепловые, радиолокационные, магнитные). Главным достоинством формализованного дешифрирования является воспроизводимость результатов обработки изображений при повторении параметров работы программы. Основная методическая трудность — правильный подбор параметров, отвечающий, как структуре изображения, так и практическим целям исследования.

Основным инструментарием программного пакета LESSA являются протяженные линеamentы на разных порогах выраженности, поля общей плотности и отдельно по 8 основным направлениям, статистически достоверные линии вытянутости роз-диаграмм малых линеamentов (структурные линии). Применительно к объекту исследований — юго-западной части Прибайкалья были подобраны черно-белые космоснимки Landsat с генерализованным разрешением ~100 м и ЦМР, построенная на базе SRTM съемки с генерализованным разрешением ~90 м. Обработка космоснимков и ЦМР проводилась методом подбора порога выраженности, который наиболее полно отражает иерархическую соподчиненность выделяемых линейных структур региона. На выбранном, в нашем случае, высоком пороге выраженности > 150 выделены протяженные линеamentы, которые трассируют основные глубинные разломы, обычно совпадающие с результатами геологического картирования.

На более низких порогах выраженности линеamentный рисунок соотносится с разными типами и рангами разломов и может быть использован для построения роз-диаграмм по направлениям. Выделение 20 “старших” (наиболее выраженных в данном направлении) протяженных линеamentов по каждому из 8 направлений статистически уравнивает все направления и искусственно подавляет преобладающую в пределах Байкальского рифта северо-восточную систему разломов. При анализе роз-диаграмм протяженных линеamentов мы использовали качественные, а не ко-

личественные сравнения с учетом особенностей методики LESSA, продемонстрированных на примере ЦМР этого района (Златопольский, 2020).

Для получения объективной картины геологического строения региона исследовались все поля плотности малых линеаментов, среди которых были выбраны характерные, геодинамически обусловленные поля плотности линеаментов северо-восточного и северо-западного направлений. При анализе роз-диаграмм устанавливается их вытянутость (вектор приведенной результирующей длины) в пределах заданного скользящего окна. Линии вытянутости, соединяющие соседние вектора, группируются в компактные прямолинейные или плавно изогнутые зоны разной ширины и протяженности. Полученные структурные линии часто могут быть интерпретированы как направления слоистости, зоны сгущения трещиноватости, локализации деформаций или другие виды неоднородности природной среды.

Оптимизация параметров интерактивного режима дешифрирования с использованием формализованного линеаментного анализа позволяет интерпретировать результаты в стандартных терминах строения геолого-геофизической среды. Программный комплекс LESSA обладает большой вариативностью параметров интерактивного выделения малых и протяженных линеаментов для решения геолого-геофизических задач, что обеспечивает повторяемость результатов и существенно сокращает время их получения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТНЫХ СТРУКТУР ПРИБАЙКАЛЬЯ

Применение линеаментного анализа на региональном уровне направлено на прослеживание связи структурного рисунка линеаментов с геологическим строением, геодинамикой региона и возрастом кайнозойской активизации соответствующих дизъюнктивов. Этот уровень удобен для определения стадии формирования дизъюнктива. На локальном уровне дешифрирование линейных элементов ландшафта позволяет исследовать внутреннее строение разломов и блоков, а также определять ширину зон разломов. Далее рассмотрим результаты применения охарактеризованных выше методических приемов на разных масштабных уровнях.

#### *Региональный уровень*

Результаты визуального анализа линеаментов на ЦМР приведены на рис. 2, где хорошо видна различная выраженность данных структур в пределах границ Байкальского рифта и на сопредельной территории Сибирской платформы. Наиболее протяженные линеаменты соответствуют из-

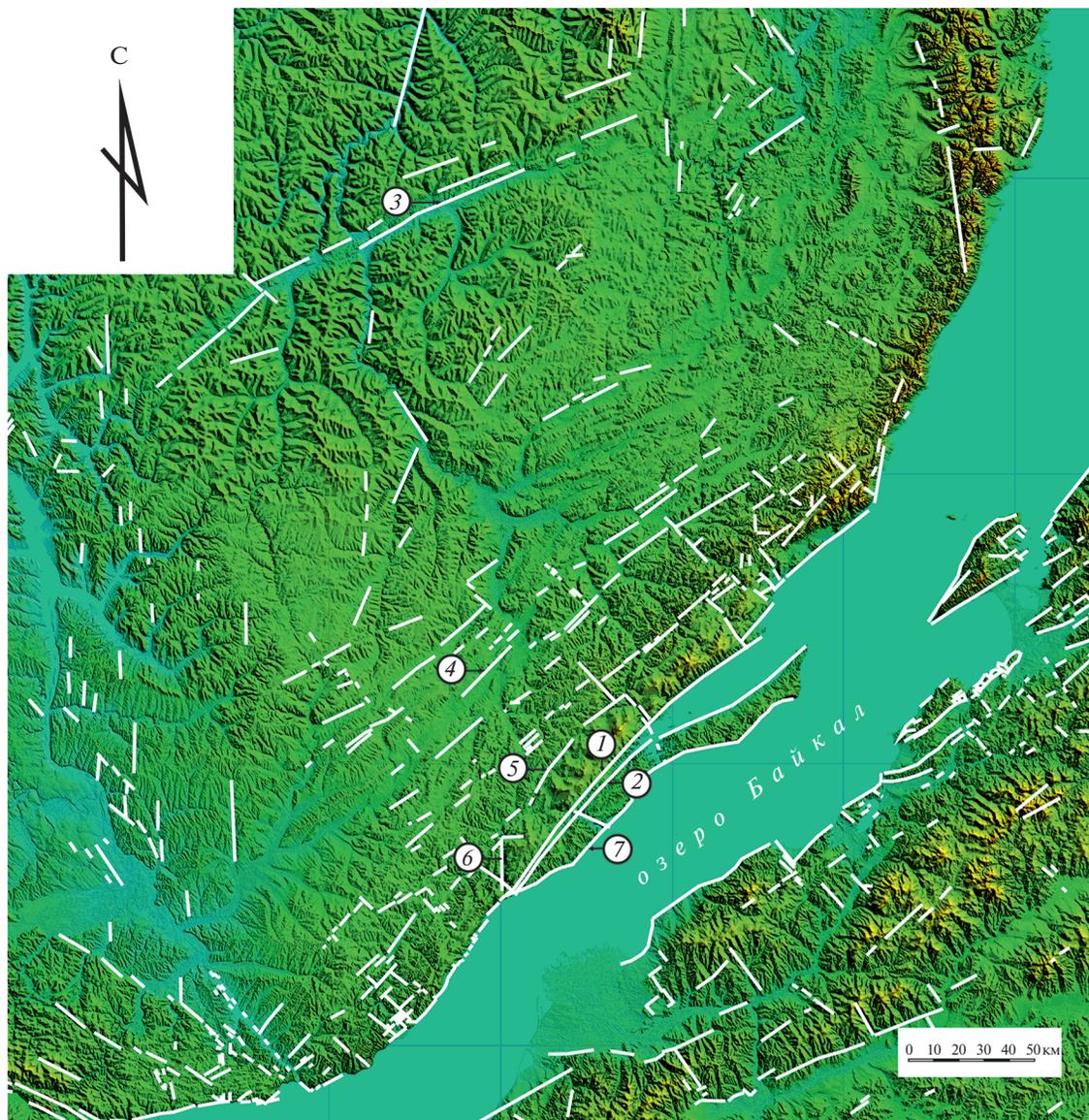
вестным крупным разломам северо-западного крыла Байкальского рифта. Это Приморский разлом, который вместе с Тырганским образует Бугульдейско-Чернорудский грабен (см. рис. 2), протягивающийся от пос. Бугульдейка до залива Мухор оз. Байкал (Mats et al., 2007).

Также хорошо выражен в рельефе Сибирской платформы крупный Жигаловский разлом. Эти и некоторые другие разломы региона (такие как Ольхонский, Бугульдейский) находятся на стадии сформированного магистрального сместителя. Линеаментный анализ позволил точнее закартировать и некоторые разломы, “переживающие” позднюю дизъюнктивную стадию развития, такие как Прихребтовый и Предбайкальский разломы, выраженные полосой линеаментов протяженностью первые десятки километров (см. рис. 2).

Ширина полосы может быть установлена путем оконтуривания линеаментов, образующих выявленную полосу, соответствующую зоне динамического влияния разломов. Однако, установление мощности зон этих разломов затруднительно. Более вероятно решение этой задачи при укрупнении масштаба исследования, которое позволяет картировать в пределах зон крупных разломов менее протяженные разрывы второго и последующих порядков. Такая задача решена на локальном уровне, что будет показано далее.

Компьютерный линеаментный анализ космоснимков на региональном уровне позволил получить следующие результаты (рис. 3). Так, на высоком пороге выраженности линеаментов >150 трассируются основные разломы, активные в плиоцен-четвертичное время (Лунина, 2016). Этим автором при визуальном дешифрировании использованы цифровые модели рельефа SRTM 90 м (Consortium for Spatial Information, 2004), космические снимки со спутников серии “Landsat” (Google Earth). Даже на мелкомасштабных космоснимках, находящихся в открытом доступе, уверенно выделяются такие крупные разломы как Жигаловский, Приморский, Ангаро-Бугульдейский, Ангарский и Предбайкальский. Некоторые из них характеризуются не единым сместителем, а протяженной полосой близкорасположенных малых линеаментов. Так, на схеме компьютерного дешифрирования космоснимка, система Предбайкальского прогиба выделяется сложнопостроенной протяженной зоной ЮЗ–СВ направления, согласной с простираемостью прогиба. Вдоль долины реки Ангары тоже прослеживается сложнопостроенная зона, представленная протяженным субмеридиональным линеаментом и опережающим линеаментом СЗ–ЮВ простираения (рис. 3, а).

На схеме формализованного дешифрирования ЦМР с порогом выраженности линеаментов >140 субмеридиональная система протяженных линеаментов (рис. 3, б) соответствует границе мегали-



**Рис. 2.** Результаты визуального линейментного анализа ЦМР. Линейменты, соответствующие разломам: 1 – Приморскому, 2 – Тырганскому, 3 – Жигаловскому, 4 – Предбайкальскому, 5 – Прихребтовому, 6 – Бугульдейскому, 7 – Ольхонскому.

тосферных блоков, выделенной ранее как Трансазиатский линеймент  $105^\circ$  (Драгунов, 1965) и подтвержденной в настоящее время геофизическими данными (Гатинский и др., 2020).

Уменьшение порога выраженности линейментов до  $>120$  позволяет по тем же космоснимкам выделить больше линейментов (рис. 4). В юго-восточной части территории, приуроченной к плечу Байкальского рифта, прослеживается система протяженных линейментов ЮЗ–СВ простирающихся (рис. 4, а). На северо-западе выделяется решетчатый рисунок, характеризующий сеть разрывов Сибирской платформы. Различный линейментный рисунок, по-видимому, отражает распро-

странение деформаций в “тело” платформы со стороны подвижного пояса.

На розе-диаграмме (рис. 4, а сверху слева), отражающей статистическое распределение протяженных линейментов, преобладает ЮЗ–СВ (байкальское) направление. Следующим по выраженности является субширотное направление, а субмеридиональное – подавлено. На ЦМР линейменты траассируют более молодые преимущественно четвертичные линейные структуры, поскольку развитый эрозионный рельеф возник при и после разрушения миоценовой поверхности выравнивания (рис. 4, б). Преобладающее распространение получают протяженные линей-

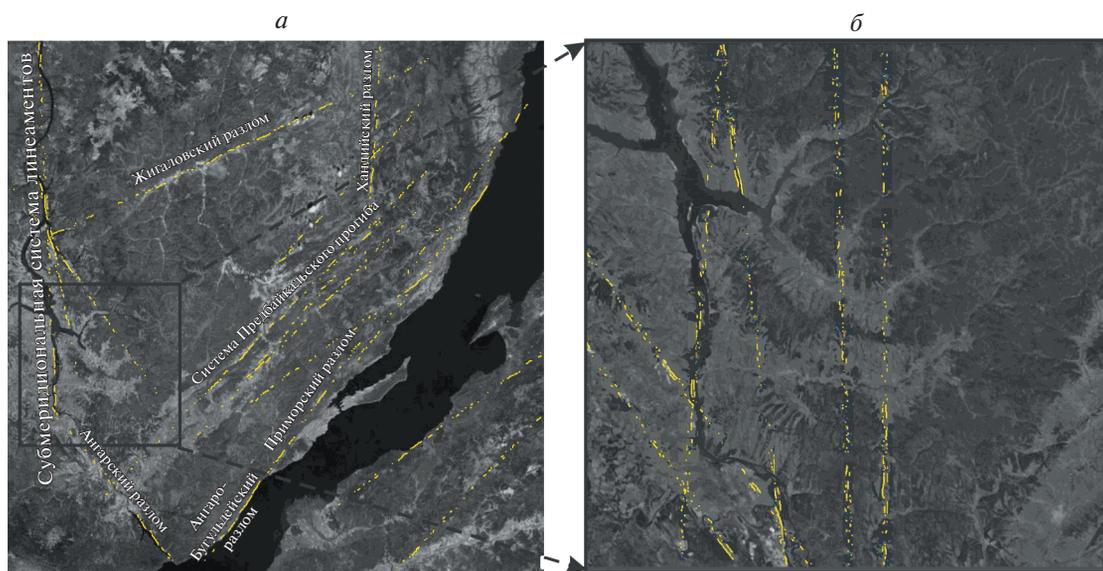


Рис. 3. Схемы формализованного дешифрирования с порогом выраженности линеементов  $>150$  (а) и  $>140$  (б).

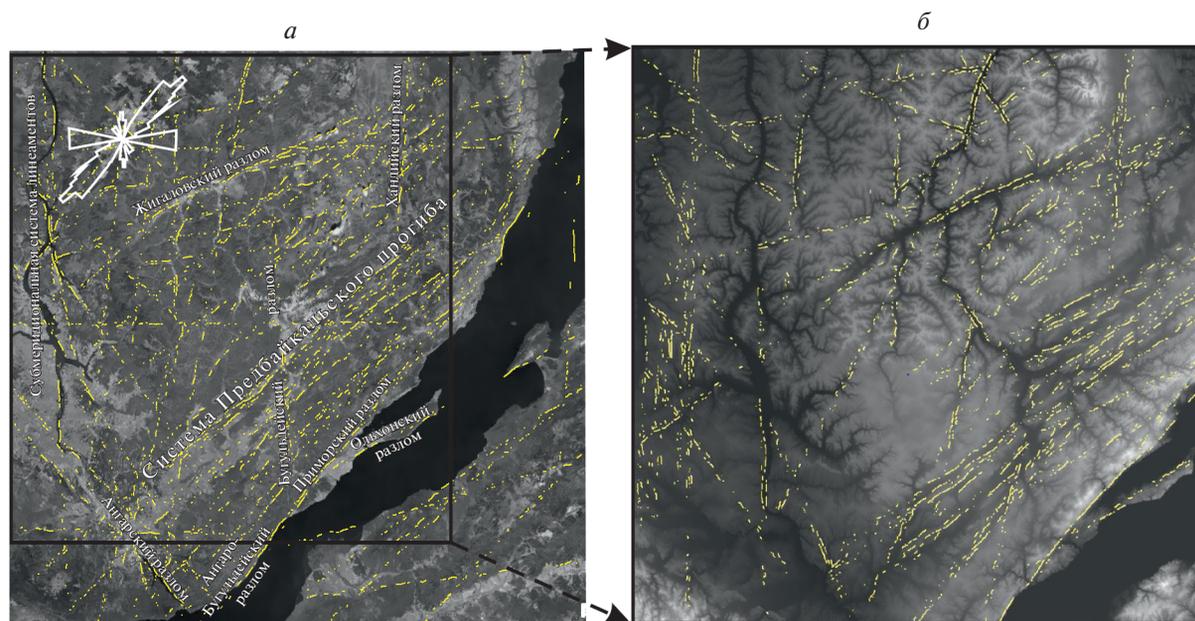


Рис. 4. Схемы формализованного дешифрирования космоснимка (а) и ЦМР (б) с порогом выраженности линеементов  $>120$ .

менты СВ и субмеридионального направлений. Ширина Предбайкальского прогиба увеличивается в направлении на СВ, что сопровождается развитием серии протяженных линеементов СВ простирания. В западной части ЦМР отчетливо прослеживается система субмеридиональных протяженных линеементов.

Роза-диаграмма, построенная для такой обширной территории, охватывающей как часть Сибирской платформы, так и значительную область подвижного пояса, отражает разновремен-

ные наложенные разрывные деформации. Для исключения деформаций, явно вызванных влиянием со стороны подвижного пояса, был применен имеющийся в программном комплексе LESSA инструментарий. Была построена схема автоматизированного дешифрирования космоснимка для 20 “старших” линеементов по 8 направлениям (рис. 5). Таким образом, проявляются все направления, которые статистически значимо выражены на космоснимке. Результат такой

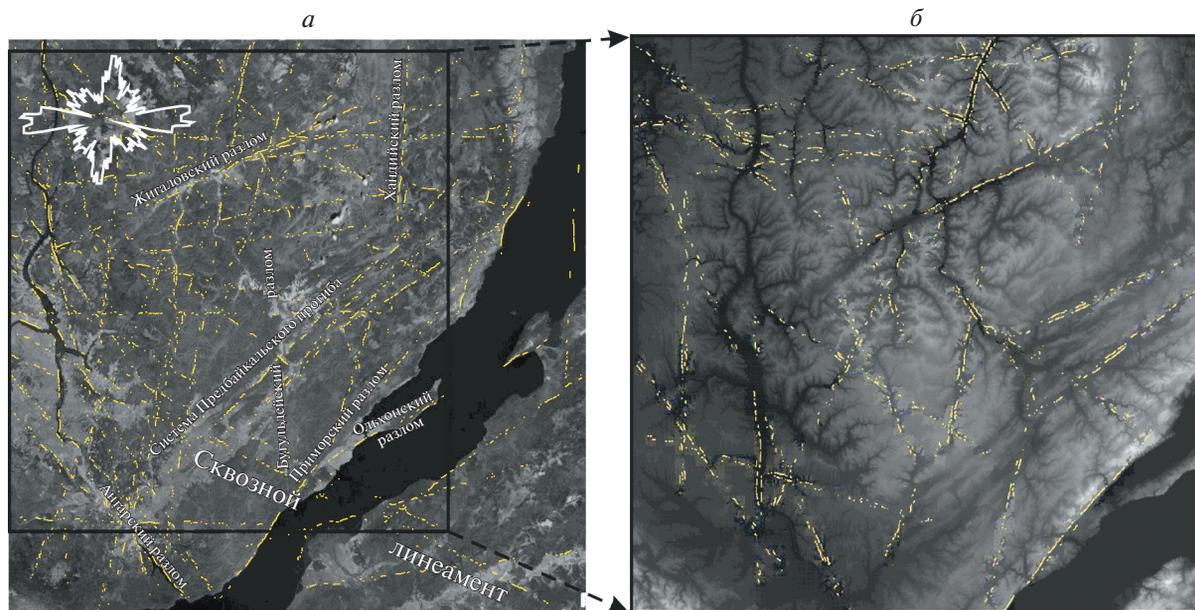


Рис. 5. Схемы формализованного дешифрирования космоснимка (а) и ЦМР (б) для 20 “старших” линеаментов по 8 направлениям.

операции отражен на общей розе-диаграмме (рис. 5, а вверху слева).

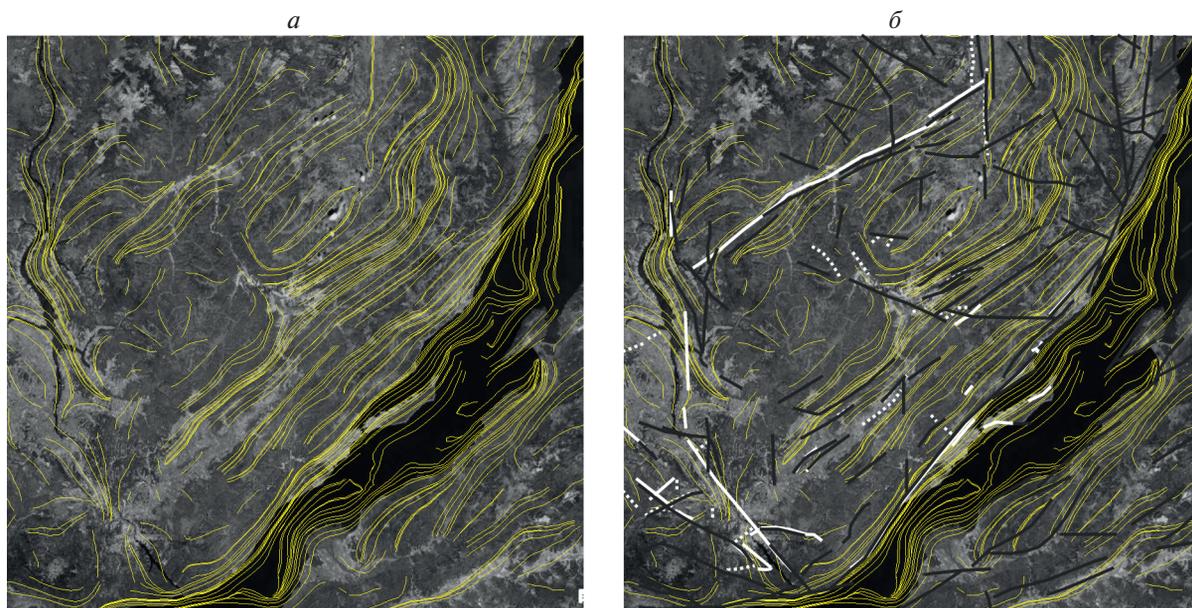
Необходимо отметить, что при данном подходе искусственного подавления преобладающего, доминирующего СВ и некоторых других направлений выделяются ортогональные системы протяженных линеаментов субширотного и субмеридионального направлений, что, вероятно, свидетельствует об их связи с более древней (доплиоценовой?) структурой региона. Кроме того, подавление доминирующего направления способствовало выявлению Сквозного линеамента (линеamentной зоны, состоящей из 3 субпараллельных линеаментов), прослеженного на северо-западном и юго-восточном побережьях оз. Байкал (рис. 5, а). Подобные дизъюнктивные структуры, ортогональные к основным разломам байкальского (северо-восточного) направления, охарактеризованы в работах (Хренов, 1971; Мац и др., 2001 и др.). Примененный нами инструментальный программный комплекс LESSA позволил проследить Сквозную линеamentную зону не только в окрестностях Байкальского рифта, но и на значительном удалении от него – в пределах Сибирской платформы и Забайкалья.

На ЦМР, обработанной по методу выделения 20 “старших” линеаментов, сохраняются все направления при уменьшении общего количества выделенных молодых линеаментов (рис. 5, б). Система субширотных протяженных линеаментов прослеживается в северной части рассматриваемой ЦМР, которая соответствует южной части Сибирской платформы. Эти структуры, по-види-

мому, являются более ранними, по сравнению с северо-восточными, обусловленными взаимодействием платформы и подвижного пояса.

По результатам цифровой обработки космоснимка наряду с протяженными линеаментами были выделены структурные линии (линии вытянутости роз-диаграмм малых линеаментов), часто представляющие собой линии неоднородности геологических свойств среды (зоны локализации деформаций, зоны сгущения трещиноватости и др.) (рис. 6).

Рисунок этих линий является производной как преобладающего направления малых линеаментов, так и их пространственного расположения, что соответствует зонно-блоковому строению рассматриваемого региона. Межблоковые зоны представлены сгущением структурных линий и основными протяженными линеаментами, выделяемыми на ЦМР (рис. 6. б). Сопоставление схемы иерархии зонно-блоковой структуры Прибайкалья (Семинский и др., 2012) с линиями вытянутости роз-диаграмм свидетельствует об их соотносительности. Наряду с отчетливо выраженным блоковым строением в пределах Онотского поднятия при компьютерном дешифрировании космоснимка прослеживаются различия во внутреннем строении блоков и межблоковых зон. Так, южное окончание Иркутского амфитеатра, характеризуется центробежным рисунком структурных линий, а территория к СВ от этого блока отличается наличием структурных линий ЮЗ–СВ направления, что, вероятно, связано со сменой простираения границы Сибирской плат-



**Рис. 6.** Линии вытянутости роз-диаграмм (а), построенные на основе формализованного линеamentного анализа (Иванченко, Горбунова, 2021), и синтетическая схема иерархии зонно-блоковой структуры юго-запада Прибайкалья с учетом линеamentов, выделенных в работах (Семинский и др., 2012, черные линии; Лунина, 2016, белые линии – достоверные разломы, активные в плиоцен-четвертичное время, точечный пунктир – предполагаемые) (б).

формы с СЗ (саянское) – Главный Саянский разлом на СВ (байкальское) – Приморский разлом и соответствующего воздействия со стороны подвижного пояса. При этом, на стыке саянского и байкальского направлений формируется субмеридиональная структура, выраженная соответствующей системой линеamentов (рис. 3) и ориентировкой линий вытянутости роз-диаграмм (рис. 6). Ширина сгущений структурных линий в целом сопоставима с мощностью межблоковых зон, установленной по результатам наземных геолого-геофизических исследований (Семинский и др., 2012). Однако для более точного определения этого параметра дизъюнктивов необходимо проводить анализ с использованием более детальных исходных материалов – космоснимков, ЦМР и топографических карт крупного масштаба.

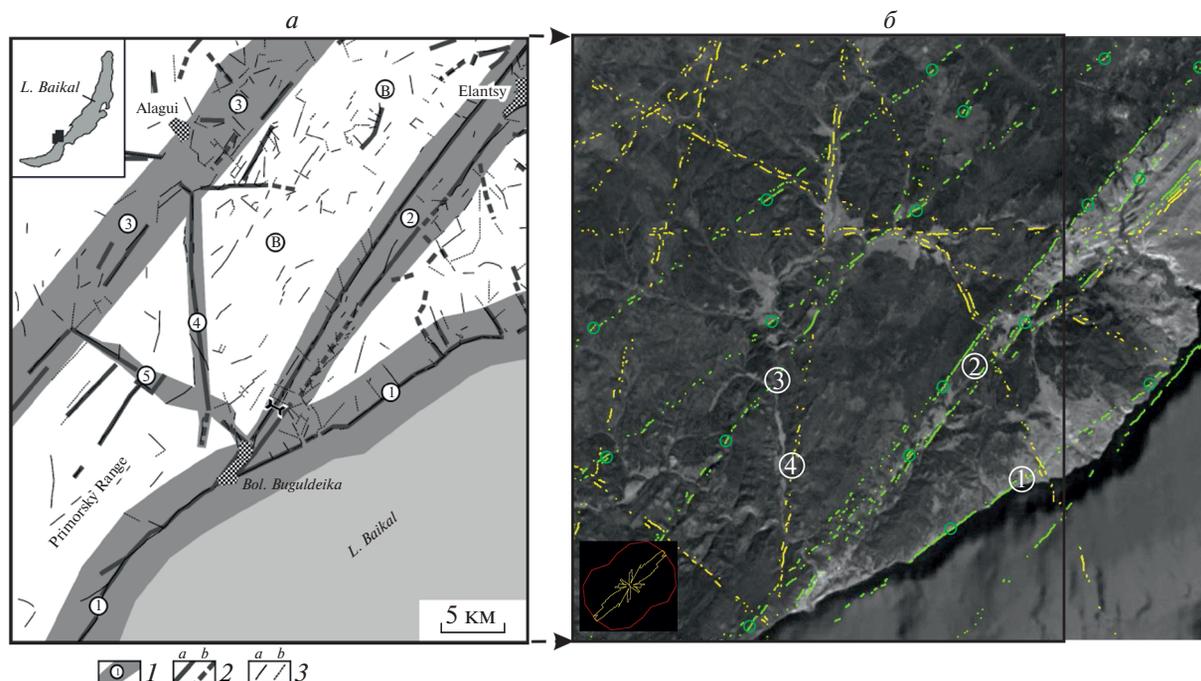
#### *Локальный уровень*

В качестве примера информативности обработки космоснимков с использованием программного пакета LESSA для анализа геодинамической обстановки на локальном уровне выбран участок в районе Бугульдейского разломного узла, где в непосредственной близости расположены такие разломы как Приморский, Ольхонский, Прихребтовый, Бугульдейский, Куртунский (Черемных и др., 2018), и участок вдоль зоны Приморского разлома.

Первый участок приурочен к Бугульдейскому дизъюнктивному узлу (рис. 7, а). В его пределах

прослежены протяженные линеamentы СВ простирания, соответствующие Байкальскому направлению, которое является приоритетным и отчетливо выражено на сводной розе-диаграмме (рис. 7, б вверху справа). Остальные направления протяженных линеamentов – субмеридиональное, субширотное и северо-западное имеют подчиненное значение и являются равноценными. Несмотря на некоторые отличия картины линеamentов, полученной при визуальном и компьютерном дешифрировании, результаты в целом подобны. Так, серия прослеженных протяженных линеamentов соответствует сетке известных разломов. Особенно показательна роза-диаграмма малых линеamentов участка (рис. 7, б внизу слева), которая хорошо совпадает с парагенезом сбросовой зоны, характерным для Обручевской системы разломов (Черемных и др., 2018).

Одновременно с этим выделяется ряд сквозных протяженных линеamentов, например, субширотный, субмеридиональный и по направлению СЗ–ЮВ (рис. 7, б), которые лишь фрагментарно прослежены на схеме разломов (рис. 7, а). Дополнительно по данным формализованного анализа в пределах седловины водораздела между реками Бугульдейка и Анга отмечен дизъюнктивный узел, который представлен взаимопересекающимися линеamentами трех направлений и соответствует участку древней палеодолины Пра-Манзурки (Мац и др., 2001).



**Рис. 7.** Схема разломов в районе Бугульдейского дизъюнктивного узла (а) (Черемных и др., 2018) и схема формализованного дешифрирования (б) с порогом выраженности линеементов >150 (светлые линии), в том числе >170 (светлые линии с кружками) (б). 1 – разломные зоны (цифры в кружках): 1 – Ольхонская (Морская), 2 – Приморская (Бугульдейско-Чернорудский грабен), 3 – Прихребтовая, 4 – Бугульдейская, 5 – Куртунская; 2 – линеементы, закартированные на основе анализа топографических карт масштаба 1 : 100000 (а – хорошо выраженные в рельефе, б – слабо проявленные); 3 – линеементы, закартированные при анализе топооснов масштаба 1 : 25000 (а – хорошо выраженные, б – слабо проявленные).

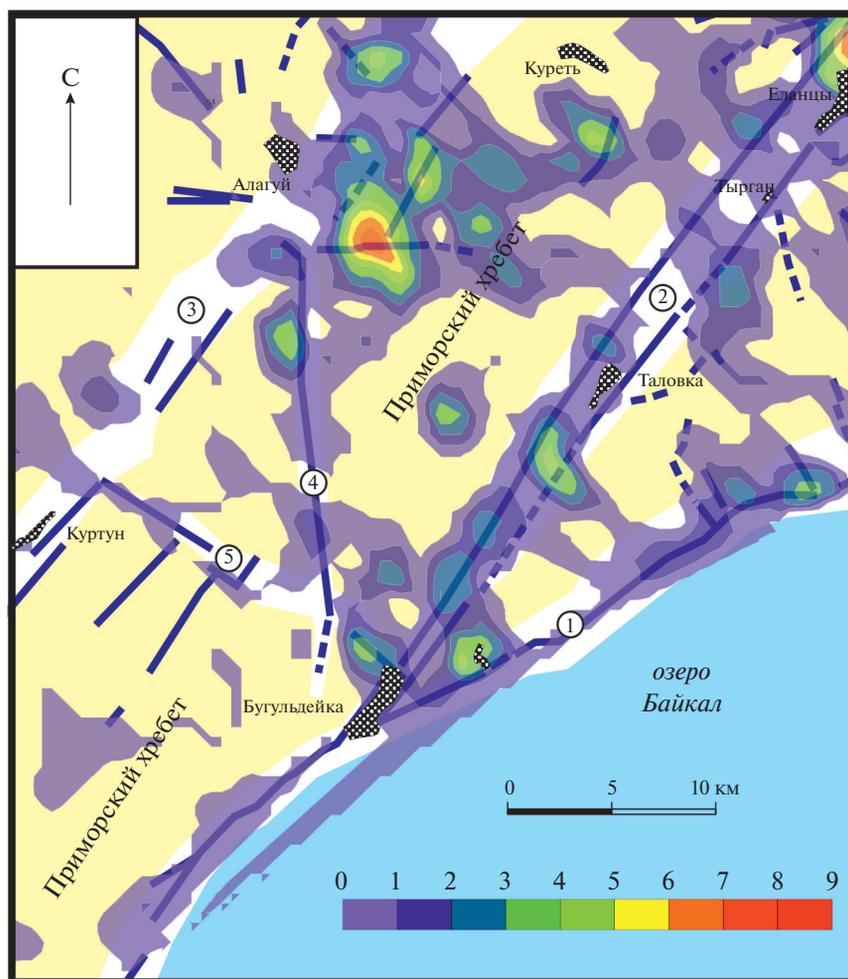
Крупные разломные зоны характеризуются зоной динамического влияния (Шерман и др., 1983), ширина которой может быть установлена путем анализа распределения плотности малых линеементов. На первом локальном участке такое исследование проведено на основе анализа плотности линеементов, хорошо выраженных на топоосновах масштаба 1 : 25000 (рис. 8). На схеме отчетливо прослеживаются Приморская и Ольхонская крупные разломные зоны, а также зона менее протяженного Бугульдейского разлома. Они выделяются цепочечными расположениями максимумов плотности линеементов в пределах зон динамического влияния разломов. Контуры разломных зон на карте (см. рис. 8) проведены по границам локальных разрывов-линеементов, параллельных и причлняющихся к магистральному сместителю разлома (Приморский, Ольхонский и Бугульдейский дизъюнктивы), либо образующих скопления различно ориентированных дислокаций (Прихребтовый и Куртунский разломы) (Черемных и др., 2018). Полученные таким образом контуры Приморской и Прихребтовой разломных зон корреспондируют с шириной межблоковых зон, полученной путем комплексного анализа геолого-геофизической информа-

ции вдоль профиля пос. Баяндай – мыс. Крестовский (Семинский и др., 2012).

В пределах второго участка, приуроченного к южной окраине Малого моря (рис. 9), было проведено исследование внутренней структуры Приморского разлома и прилегающей территории. Разлом отчетливо проявляется в виде уступа рельефа вдоль юго-восточного склона Приморского хребта, который в кайнозойский период развивался как сдвигоброс с преобладанием вертикальной компоненты смещения, азимут падения сместителя ~145°, угол ~70° (Денисенко, Лунина, 2020).

Характер рисунка линеементов в пределах участка сильно отличается. Так, в СЗ части участка сеть линеементов характеризуется наличием структур разного простирания, а в его ЮВ части наблюдается значительное преобладание разрывов СВ простирания (рис. 9, а). В целом, на розе-диаграмме простирания малых линеементов преобладает ЮЗ-СВ направление (на рис. 9, а вверху справа).

В соответствии со схемой плотности малых линеементов СВ направления Приморский разлом по простиранию характеризуется четковидным строением, определяемым чередованием различ-



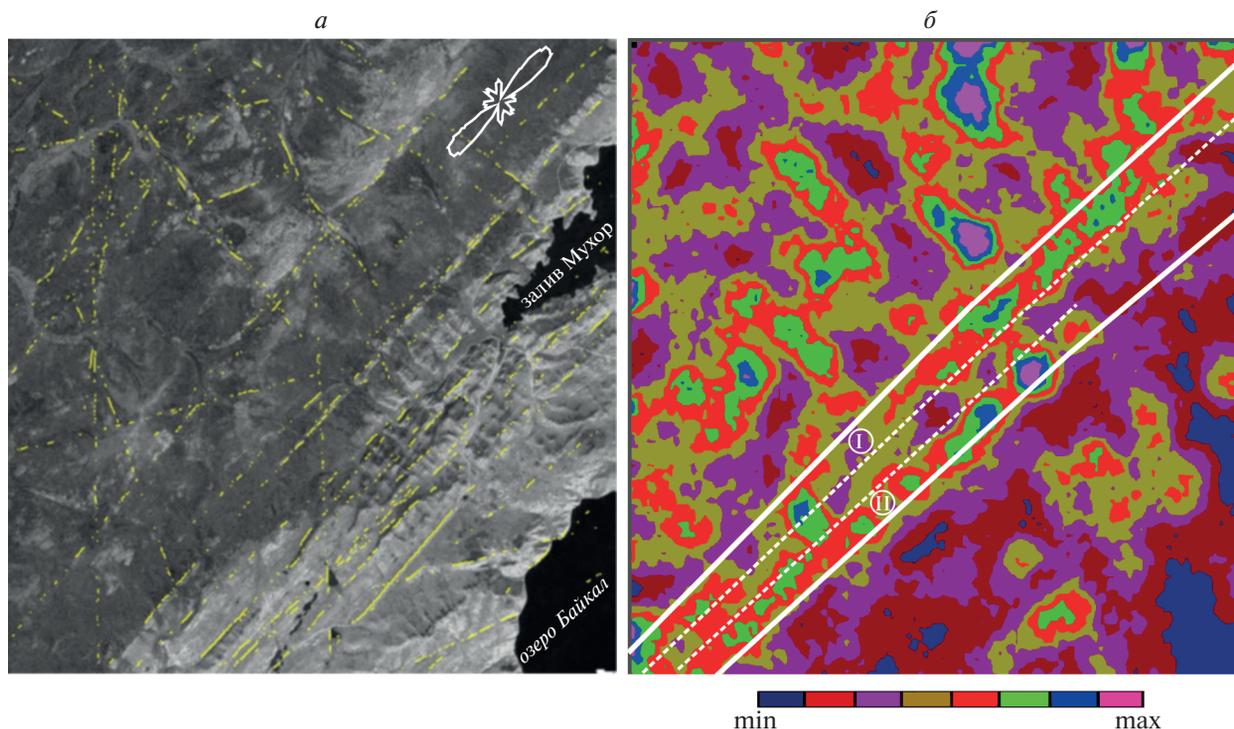
**Рис. 8.** Сопоставление плотности малых линейаментов с разломными зонами Бугульдейского узла. Цифры в кружках соответствуют разломным зонам на рис. 7.

ной плотности линейаментов (рис. 9, б). Такое строение, вероятно, свидетельствует о присутствии сдвиговой компоненты в новейшей кинематике разлома.

Отмеченный ранее решетчатый рисунок линейаментов, характерный для Сибирской платформы, отчетливо проявляется на СЗ исследуемой территории в поле плотности малых линейаментов. Одновременное исследование протяженных линейаментов со схемой плотности малых линейных элементов позволяет оконтурить Приморскую разломную зону, а также выделить в пределах этой зоны, охватывающей весь Бугульдейско-Чернорудский грабен (рис. 7, а), две подзоны, соответствующие Приморскому и Тырганскому разломам (рис. 9, б). Последнее, безусловно, связано с величиной окна, использованного при подсчете плотности линейаментов, что должно учитываться при проведении подобных исследований.

Дополнительно карты плотности позволяют установить специфику строения зон крупных разломов — выявить сегменты разломов, осложненные близко расположенными парагенетически связанными с ними мелкими разрывами. Окончание зоны Тырганского разлома на северо-востоке участка исследований ограничено акваторией залива Мухор озера Байкал.

Таким образом, исследования, проведенные на двух масштабных уровнях, позволили откартировать Сквозной линейамент, подтвердить существование Субмеридиональной зоны линейаментов вдоль западной границы территории исследований, а также изучить некоторые характеристики известных разломных зон Прибайкальской — Предбайкальской, Прихребтовой и Приморской. Проведенный анализ позволяет как собственно картировать линейные элементы рельефа, так и, для вновь выявленных линейаментов и известных разломных зон, получать новые дан-



**Рис. 9.** Схемы формализованного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов  $>150$  (а) и пространственного распределения плотностей малых линеаментов СЗ направления (б) (Сплошные белые линии на рис. 9, б – границы разломных зон, пунктирные – границы подзон. Номера в кружках – разломы: I – Приморский, II – Тырганский).

ные о длине, ширине, стадии развития и внутренней структуре.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследования особенностей внутреннего строения и морфометрии разломных зон различного иерархического уровня использован линеаментный анализ на основе визуального и компьютерного дешифрирования. Показано, что компьютерное дешифрирование позволяет провести статистический анализ параметров (протяженных линеаментов, полей плотностей и ориентировку преобладающего направления на розах-диаграммах малых линеаментов) и получить результаты сопоставимые с натурными разломами.

Совместная обработка протяженных линеаментов и структурных линий, выделенных с использованием программного пакета LESSA, направлена на изучение природы линеаментов и зонно-блокового строения региона. Применение “фильтрации” линеаментов путем искусственного подавления некоторых направлений (выделение 20 наиболее проявленных линеаментов различных азимутальных направлений) способствует проявлению относительно более ранних линеаментов, часто слабо выраженных в совре-

менном рельефе из-за наложения молодых тектонических нарушений.

Интерпретация основных параметров статистических полей малых линеаментов (секторная и общая плотность, линии вытянутости розы-диаграммы малых линеаментов) позволяет охарактеризовать тектоническую раздробленность земной коры. В ряде случаев, особенно на локальном уровне, можно получать дополнительную информацию о внутренней структуре крупных разломных зон. Некоторые разломы, находящиеся на ранней дизъюнктивной стадии (скрытые разломы по (Макаров, Шукин, 1979; Мац и др., 2001 и др.)), выделяются как линейные зоны повышенной плотности малых линеаментов. Скопления малых линейных элементов рельефа характерно и для хорошо сформированных разломных зон. В связи с чем, представляется весьма перспективной возможность изучения зон разрывных нарушений путем построения карт плотности малых линеаментов.

Апробация подобного научно-методического подхода ранее была проведена авторами для сейсмогенных структур: Тункинской рифтовой впадины ЮЗ фланга Байкальской рифтовой системы и межгорной Чуйской впадины Алтая (Иванченко, Горбунова, 2015). При анализе геодинамиче-

ской обстановки Тункинской впадины установлено, что сочетание протяженных линеаментов и структурных линий характеризует поля тектонических напряжений и особенности строения этой рифтовой впадины. Применение компьютерного дешифрирования в сейсмоактивной зоне Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. М 6.3 позволило понять процесс подготовки основного толчка и исследовать афтершоковый процесс на протяжении последующего ряда лет. Предложенная структурная модель эпицентральной зоны землетрясения (блоково-зональная) была заверена данными компьютерной томографии (Иванченко, 2012; Санина и др., 2005).

Сопоставление зонно-блоковой модели, представленной в работе по результатам визуального дешифрирования (Семинский и др., 2012), с полученными результатами компьютерного дешифрирования свидетельствует об общей хорошей сходимости выделенных структур (рис. 6, б). Положение достоверных разломов, активных в плиоцен-четвертичное время, приведенное в работе (Лунина, 2016), практически полностью совпадает с протяженными линеаментами, определенными нами при пороге выраженности  $>150$  (рис. 3, а, б, б).

Ранее для северо-восточного Прибайкалья, сопредельного с районом исследования, было проведено компьютерное дешифрирование с целью исследования линеаментного рисунка и восстановления полей тектонических напряжений (Балуев, Малкин, 1999). В настоящее время на основе комплексного геолого-геофизического и компьютерного линеаментного анализа выполнено сейсмотектоническое районирование зоны сочленения Евразийской плиты и Амурской субплиты (Трофименко и др., 2016). В 2020 г. для данной территории Златопольским выполнены методические разработки программного пакета LESSA применительно к цифровой модели рельефа (Златопольский, 2020). Результаты этой работы были учтены авторами при интерпретации данных дистанционного зондирования.

Компьютерное дешифрирование позволяет выполнять мелкомасштабное картирование протяженных региональных линеаментов в разных геотектонических областях (Сибирская платформа, Байкальская рифтовая система, Забайкалье). Выделенный Сквозной линеамент СЗ–ЮВ направления (линеаментная зона) (рис. 5), не отмеченный ранее на картах, прослеживается во всех геотектонических областях, что свидетельствует о его возможной неотектонической активности.

При крупномасштабном картировании южная часть Бугульдейской субмеридиональной разломной зоны, выделенная между Прихребтовой и Приморской зонами, детально исследована комплексом геолого-структурных методов (Cherem-

nykh et al., 2020). В то же время использование компьютерного дешифрирования позволило проследить рассматриваемую линеаментную зону севернее Прихребтовой разломной зоны в пределах окраины Сибирской платформы.

На западе исследуемой территории была изучена сложнопостроенная субмеридиональная линеаментная зона (Трансазиатский линеамент  $105^\circ$ ) (рис. 3, б), которая ранее на глобальном уровне на геологических картах прослеживалась в виде границы между литосферными блоками. В региональном плане авторами статьи отмечено, что субмеридиональная зона состоит из серии субпараллельных протяженных линеаментов.

Дополнительно выделенные линеаментные зоны на региональном уровне (Сквозной линеамент, северное продолжение Бугульдейского разлома, линеаментная зона  $105^\circ$ ), которые частично откартированы на геологических картах, могут соответствовать разломам, преимущественно активным на неотектоническом этапе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формализованное (компьютерное) дешифрирование космоснимков с низким уровнем разрешения (мелкомасштабное картирование), которые находятся в открытом доступе, позволяет анализировать геодинамическую обстановку территории исследований на региональном уровне. Для корректной интерпретации результатов линеаментного анализа на местности выбираются опорные участки (крупномасштабное картирование), в пределах которых могут быть выполнены детальные геологические изыскания, включающие полевое картирование основных систем трещиноватости и разрывных нарушений.

Юго-западная часть Прибайкалья впервые исследуется комплексно на основе полевых работ, визуального и интерактивного компьютерного дешифрирования с использованием программного пакета LESSA. В результате проведенных исследований на мелкомасштабном уровне:

- определены преобладающие (приоритетные) направления протяженных линеаментов на различных этапах эволюции геодинамических условий в кайнозойе на основе анализа соотношения лучей роз-диаграмм при совместной обработке космоснимков и ЦМР;

- дополнительно выделены протяженные линеаментные зоны, протягивающиеся через разные тектонические области с различным режимом геодинамической активности, которые частично откартированы на геологических картах (северная часть Бугульдейской зоны, Сквозная линеаментная зона и зона  $105^\circ$ ), которые могут соответствовать разломным зонам, находящимся на разных стадиях формирования.

– определены границы области влияния Байкальской рифтовой системы на тектонический режим периферии Сибирской платформы, выраженные в смене линеamentного рисунка с зонно-блокового (решетчатого) в пределах Сибирской платформы на линейный с преобладающим байкальским направлением (ЮЗ–СВ) серии протяженных линеamentов, отраженной на сводных розах-диаграммах протяженных линеamentов и в полях плотности малых линеamentов.

По данным полевых исследований на ключевых участках и обработки данных дистанционного зондирования установлены:

– сложное внутреннее строение линеamentных зон, представленное чередованием областей с максимальными и минимальными значениями плотностей малых линеamentов (клавишно-блоковые структуры). В частности, изменчивость полей плотности линеamentов в пределах Приморского и Прихребтового разломов позволяет зонировать эти глубинные структуры и определять их кинематику.

– зоны динамического влияния разломных зон (линеamentных зон) и их ширина на основе анализа всей совокупности структур.

Формализованный линеamentный анализ позволяет определять структурный рисунок региона, исследовать внутреннюю структуру блоков и межблоковых зон, морфокинематику и внутреннее строение глубинных разломов. Разная выраженность глубинных разломов в линеamentных зонах, подтвержденная комплексным анализом на уровне статистических характеристик пространственного и ориентационного распределения малых линеamentов, отражает уровень их геодинамической активности на неотектоническом этапе развития региона. Изучение взаимосвязи новейших и современных разрывных и пластических деформаций участков земной коры способствует реконструкции полей напряжений в различные геологические периоды.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено по темам государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы № 122032900172-5 “Развитие методов контроля геодинамических процессов разного иерархического уровня, в том числе инициированных техногенной деятельностью” и № FWEF-2021-0009 “Современная геодинамика, механизмы деформации литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированный анализ природных линеamentных систем. Л.: ВСЕГЕИ (Всесоюзный геологический институт). 1988. 131 с.

*Анисимова О.В., Короновский Н.В.* Линеamentы центральной части Московской синеклизы и их связь с разломами фундамента // Геотектоника. 2007. № 4. С. 71–90.

*Аржанникова А.В., Гофман Л.Е.* Проявление неотектоники в зоне влияния Приморского разлома // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 811–818.

*Балуев А.С., Малкин Б.В.* Поля тектонических напряжений северо-западной части Байкальской рифтовой зоны по данным компьютерного анализа космических снимков // Исследование Земли из космоса. 1999. № 2. С. 71–78.

*Бондур В.Г., Гапонова Е.В.* Регистрация из космоса аномальных вариаций линеamentных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой  $M = 5.6$ , состоявшегося 21 сентября 2020 года // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>

*Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.

*Гаврилов А.А.* Структурные элементы впадины Японского моря и прилегающей континентальной и островной суши по данным космогеологических исследований // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 27–40. <https://doi.org/10.31857/S0205961420040041>

*Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н.* Выявление аномалий линеamentных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 36–47. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019636-47>

*Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В.* Геодинамические режимы Центральной Азии западнее и восточнее геораздела 102–104° // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 334–351. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0478>

*Денисенко И.А., Лунина О.В.* Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморского разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 548–565. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>

*Драгунов В.И.* Транссибирский, Трансазиатский, Кольско-Монголо-Охотский линеamentы и некоторые вопросы минерагии // Общие закономерности геологических явлений. Л.: 1965.

*Златопольский А.А.* Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Соврем. проблемы дист. зондир. Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 102–112.

*Златопольский А.А.* Получение ориентационных характеристик территории с помощью технологии LESSA. Методика и тестирование на цифровой модели рельефа Предбайкалья // Соврем. проблемы дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 98–110. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110>

- Иванченко Г.Н.* Интерпретация результатов автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования при оценке современной геодинамической обстановки. М. 2012. 130 с. Диссертация на соискание уч. ст. к. ф.-м. н.
- Иванченко Г.Н.* Картирование протяженных (региональных) линейных элементов по дистанционным материалам // В сб. Структурно-геоморфологические исследования М.: ИФЗ АН СССР. 1991. С. 131–140.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Выраженность рифейских авлакогенов Восточно-Европейской платформы в поле линейных и линейно-зональных форм // Всероссийская конференция с международным участием “Проблемы сейсмоструктуры”. Москва: ИФЗ РАН. 2011. С. 218–223.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС, 2015. 112 с.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Формализованный линейно-зональный анализ геологических структур Прибайкалья // Физика Земли. 2021. № 5. С. 223–234. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050082>
- Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н.* Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
- Кузьмин С.Б.* Геоморфология зоны Приморского разлома (Западное Прибайкалье) // Геоморфология. 1995. № 4. С. 53–61.
- Куприков Д.Н., Викентьев И.В.* Применение данных космодешифрирования для изучения рудоконтролирующих структур Лебединского рудно-россыпного узла, южная Якутия // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 45–54. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019345-54>
- Леви К.Г., Хромовских В.С., Кочетков В.М., Николаев В.В., Семенов Р.М., Серебрянников С.П., Чипизубов А.В., Демьянович М.Г., Аржанников С.Г., Дельянский Е.А., Смекалин О.П., Ружич В.В., Буддо В.Ю., Масальский О.К., Потапов В.А., Берзинский Ю.А., Радзиминович Я.Б.* Современная геодинамика: сейсмоструктура, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты). Статья II // Литосфера Центральной Азии / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. 1996. С. 150–182.
- Лунина О.В.* Цифровая карта разломов для плиоцено-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>
- Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В.* Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5. С. 446–455
- Макаров В.И., Шукин Ю.К.* Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–107.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М.* Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2001. 252 с.
- Миловский Г.А., Беляков А.А.* Применение дистанционного зондирования для выявления особенностей тектонического строения и локализации оруденения в пределах Бирюсинского и Крепско-Туманшетского рудных узлов (восточный Саян) // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 55–65. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019355-65>
- Ранцман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 171 с.
- Санина И.А., Усольцева О.А., Иванченко Г.Н., Еманов А.Ф.* Модель глубинного строения зоны Чуйского землетрясения по данным сейсмической томографии и дистанционного зондирования // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. Труды ИДГ РАН. М., 2005. С. 64–70.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Бурзунова Ю.П.* Межблоковые зоны северо-западного плеча Байкальского рифта: результаты геолого-геофизических исследований по профилю пос. Баяндай – м. Крестовский // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 2. С. 250–269.
- Семинский К.Ж., Семинский Ж.В.* Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2016. 204 с.
- Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А.* Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 771–800. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0371>
- Трофименко С.В., Гильманова Г.З., Никитин В.М., Колодезников И.И.* Линейно-зональный анализ пространственного поля сейсмичности северного сегмента Амурской микроплиты // Наука и образование. 2016. № 1. С. 7–13.
- Хренов П.М.* Скрытые зоны глубинных разломов складчатых областей и платформ (на примере юга Восточной Сибири) // Глубинные разломы юга Восточной Сибири и их металлогеническое значение. М.: Наука. 1971. С. 5–38.
- Черемных А.В., Черемных А.С., Бобров А.А.* Морфо-структурные и структурно-парагенетические особенности разломных зон Прибайкалья (на примере Бугульдейского дизъюнктивного узла) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 9. С. 1372–1383.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геологоструктурные методы их изучения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 158 с.

*Agar S.M., Klitgord K.D.* Rift flank segmentation, basin initiation and propagation: a neotectonic example from Lake Baikal // *J. Geol. Soc.* 1995. V. 52. P. 849–860.

*Cheremnykh A.V., Burzunova Yu.P., Dekabryov I.K.* Hierarchic features of stress field in the Baikal region: Case study of the Buguldeika Fault Junction // *J. Geodynamics.* 2020. V. 141–142, 101797.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101797>

*Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V.* Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // *Tectonophysics.* 1997. V. 282. P. 1–38.

*Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M.* Evolution of faults in continental rift: morphotectonic evidence from the south-western termination of the North Baikal basin // *Earth Sci. Front.* 2007. V. 14. № 1. P. 207–219.

*Seminsky K.Zh.* Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2012. V. 3. № 3. P. 183–194. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0070>.

*Zlatopolsky A.A.* Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis). Automated linear image features analysis - experimental results // *Computers and Geosciences.* 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

## Some Possibilities of Lineament Analysis for Mapping Different Rated Faults (for Cisbaikalia Example)

G. N. Ivanchenko<sup>1</sup>, E. M. Gorbunova<sup>1</sup>, and A. V. Cheremnykh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

The paper presents the results of lineament analysis of the Baikal region via methods of visual interpretation of digital elevation models (DEM) and topographic maps of 1: 100000 and 1: 25000 scales, and formalized (computer) processing of space images and DEM resting on the LESSA software package (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). A detailed comparison of the results of visual and computer analysis of extended lineaments and statistical fields of small lineaments of digital images of the studied region to the features of the fault-block structure within the Baikal region is carried out. The performed integration of the methods of remote sensing has raised their information capability for the area under investigation concerning mapping faults of different ranks in regions with different tectonic activity. Methods for remote sensing data processing resting on the analysis of lineaments and topographic maps have been proposed. Our methods make it possible to confidently map faults of different ranks of both geodynamically active regions (the Baikal rift system) and relatively stable territories (Siberian platform), as well as to obtain some important parameters of large fault zones at different stages of their evolution, which is supported by field observations in key areas.

*Keywords:* fault zones, lineaments, computer analyses, Baikal rift, rose diagrams, stages of fault evolution

### REFERENCES

*Agar S.M., Klitgord K.D.* Rift flank segmentation, basin initiation and propagation: a neotectonic example from Lake Baikal // *J. Geol. Soc.* 1995. V. 152. P. 849–860.

*Anisimova O.V., Koronovsky N.V.* Lineaments in the central part of the Moscow syncline and their relations to faults in the basement // *Geotektonika.* 2007. № 4. P. 71–90. (In Russian)

*Arzhannikova A.V., Gofman L.E.* Manifestation of neotectonics in the zone of influence of the Primorsky fault // *Russian Geology and Geophysics.* 2000. V. 41(6). P. 785–792. (In Russian)

Automated analysis of natural lineament systems. Leningrad: VSEGEI (All-Union Geological Institute). 1988. 131 p. (In Russian)

*Baluev A.S., Malkin B.V.* Fields of tectonic stresses in the northwestern part of the Baikal rift zone according to computer analysis of space images // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 1999. № 2. P. 71–78. (In Russian)

*Bondur V.G., Gaponova Ye.V.* Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the M = 5.6 Earthquake of September 21, 2020 //

*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020.

<https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>

*Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences,* 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.

*Cheremnykh A.V., Burzunova Yu.P., Dekabryov I.K.* Hierarchic features of stress field in the Baikal region: Case study of the Buguldeika Fault Junction // *J. Geodynamics.* 2020. V. 141–142. 101797.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101797>

*Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., and Bobrov A.A.* Faults in the Baikal region: morphostructural and structure-genetic features (case study of the Buguldeika fault junction) // *Russian Geology and Geophysics.* 2018. V. 59. P. 1100–1108. (In Russian)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2018.08.004>

*Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V.* Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // *Tectonophysics.* 1997. V. 282. P. 1–38.

- Denisenko I.A., Lunina O.V.*, 2020. Late Quaternary displacements along the Sarma segment of the Primorsky fault based on GPR survey data (Baikal rift). *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3). P. 548–565. (In Russian) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>
- Dragunov V.I.* Trans-Siberian, Trans-Asian, Kola-Mongol-Okhotsk lineaments and some questions of minerageny // General laws of geological phenomena. L.: 1965. (In Russian)
- Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Detecting lineament system anomalies during strong 6.4 and 7.1 earthquakes in California from satellite imagery // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 6. P. 36–47. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019636-47>
- Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., Rundqvist D.V.* Central Asian geodynamic regimes west and east 102–104° geodivider // *Geodynamics and tectonophysics*. 2020. V. 11. № 2. P. 334–351. (In Russian) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0478>
- Gavrilov A.A.* Structural elements of the Sea of Japan basin and adjacent continental and island dryland according to the space geological data investigations // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 4. P. 27–40. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205961420040041>
- Ivanchenko G.N.* Interpretation of the results of automated interpretation of remote sensing data in assessing the current geodynamic situation. M. 2012. 130 p. Art. Ph.D. (In Russian)
- Ivanchenko G.N.* Mapping of extended (regional) lineaments based on remote data // *Structural-geomorphological studies*. M.: IFZ AN SSSR. 1991. P. 131–140. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Application of the remote sensing data of the areas of the earth crust for analysis of the geodynamic situation. M.: GEOS, 2015. 112 p. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Expression of the Rhiphean aulacogens of the East European Platform in the field of lineaments and lineament forms // All-Russian conference with international participation “Problems of seismotectonics”. Moscow: IFZ RAN. 2011. P. 218–223. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Formalized lineament analysis of geological structures in the Baikal region // *Izv., Phys. of the Solid Earth*. 2021. V. 57. № 5. P. 779–788. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050086>
- Khrenov P.M.* Hidden zones of deep faults of folded areas and platforms (on the example of the south of Eastern Siberia) // *Deep faults in the south of Eastern Siberia and their metallogenic significance*. M., Nauka, 1971. P. 5–38. (In Russian)
- Koronovskiy N.V., Zlatopolskiy A.A., Ivanchenko G.N.* Automated interpretation of satellite images for the purpose of structural analysis // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 1986. № 1. P. 111–118. (In Russian)
- Kuprikov D.N., Vikentyev I.V.* Application of the data of space decoding for the study of ore-controlling structures of the Lebedinsky ore-placer cluster, Southern Yakutia // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 3. P. 45–54. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019345-54>
- Kuzmin S.B.* Geomorphology of the Primorsky fault zone (Western Cisbaikalia) // *Geomorphology*. 1995. № 4. P. 53–61. (In Russian)
- Levy K.G., Khromovskikh V.S., Kochetkov V.M., Nikolaev V.V., Semenov R.M., Serebrennikov S.P., Chipizubov A.V., Demyanovich M.G., Arzhannikov S.G., Delyansky E.A., Smekalin O.P., Ruzhich V.V., Buddo V.Yu., Masalsky O.K., Potapov V.A., Berzhinsky Yu.A., Radziminovich Ya.B.* Modern geodynamics: seismotectonics, earthquake forecast, seismic risk (fundamental and applied aspects). Article II // *Lithosphere of Central Asia* / Ed. O.N. Logachev. Novosibirsk: Science. Siberian Publishing Company RAS. 1996. P. 150–182. (In Russian)
- Lunina O.V.* The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2016. V. 7. № 3. P. 407–434. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V.* Fracturing in the Primorsky fault zone (Baikal rift system) // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V. 43(5). P. 446–455. (In Russian)
- Makarov V.I., Shehukin Yu.K.* Assessment of the activity of hidden faults // *Geotectonika*. 1979. № 1. P. 96–107. (In Russian)
- Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M.* Evolution of faults in continental rift: morphotectonic evidence from the south-western termination of the North Baikal basin // *Earth Sci. Front*. 2007. V. 14. № 1. P. 207–219.
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospuev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M.* Cenozoic Baikal Rift Basin: Structure and Geological History. Novosibirsk: Publishing house of SB RAS, branch “Geo”, 2001. 252 p. (In Russian)
- Milovsky G.A., Belyakov A.A.* Application of remote sensing for detection of tectonic structures and localization of ore deposits within the Biryusinsky and Krepsko-Tumanshetsky ore clusters (Eastern Sayan) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 3. P. 55–65. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019355-65>
- Rantsman E.Ya.* Places of earthquakes and morphostructure of mountainous countries. M.: Nauka, 1979. 171 p. (In Russian)
- Sanina I.A., Usoltseva O.A., Ivanchenko G.N., Yemanov A.F.* Model of the deep structure of the Chuya earthquake zone according to seismic tomography and remote sensing data // *Proceedings of the IDG RAS*. M. 2005. P. 64–70. (In Russian)
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3. № 3. P. 183–194. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0070>
- Seminskii K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospueva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Burzunova Yu. P.* Interblock zones of the northwestern Baikal rift: results of geological and geophysi-

cal studies along the Bayandai village – cape Krestovskii profile // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53(2). P. 194–208. (In Russian)

*Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V.* Special mapping of fault zones of the Earth's crust and its possibilities in the study of the structural control of kimberlites in the Alakit-Markhinsky field of the Yakutsk diamond province. Irkutsk: Publishing house IRNITU, 2016. 204 p. (In Russian)

*Sherman S.I., Bormyakov S.A., Buddo V.Yu.* Areas of dynamic influence of faults. Novosibirsk: Nauka, 1983. 112 p. (In Russian)

*Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I.* Stress fields of the earth's crust and geological structural methods of their study. Novosibirsk: Science. Sib. Department, 1989. 158 p. (In Russian)

*Sim L.A., Marinin A.V., Bryantseva G.V., Gordeev N.A.* Results of the tectonic stress of the Northern Eurasia regions // Geodynamics and tectonophysics. 2018. V. 9. № 3. P. 771–800. (In Russian)

<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0371>

*Trofimenko S.V., Gilmanova G.Z., Nikitin V.M., Kolo-deznikov I.I.* Lineament Analysis of Seismicity Spatial Field of the Northern Segment of the Amur Microplate // Science and education. 2016. № 1. P. 7–13. (In Russian)

*Zlatopolsky A.A.* Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis). Automated linear image features analysis - experimental results // Computers and Geosciences. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

*Zlatopolsky A.A.* Technique for measuring the orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology) // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2008. V 5. № 1. P. 102–112. (In Russian)

*Zlatopolsky A.A.* Using LESSA technology to obtain territory orientation characteristics. Methodology and testing with digital elevation model for the pre-Baikal region // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. № 4. P. 98–110. (In Russian)

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110>

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ТИПОМ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ  
ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ХАНОЙ, ВЬЕТНАМ**© 2022 г. Ле Хунг Чинь<sup>a, \*</sup>, В. Р. Заблоцкий<sup>b</sup>, И. В. Зеньков<sup>c, d</sup>, Зань Туен Ву<sup>e</sup>, Кхань Хоай Дао<sup>a</sup><sup>a</sup>Технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам<sup>b</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия<sup>c</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия<sup>d</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия<sup>e</sup>Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, Ханой, Вьетнам

\*E-mail: trinhlehung@lqdtu.edu.vn

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.

В работе представлены результаты оценки взаимосвязи между температурой центральной части города Ханоя и типом городской поверхности. Изображения Landsat TM и Landsat 8, собранные за период с 2000 по 2019 г., использовались для расчета температуры поверхности изучаемой территории, а также индексов, характеризующих растительный покров территории NDVI, застроенную NDBI и водную поверхность MNDWI. Вычислялся коэффициент корреляции между температурой поверхности и индексами NDVI, NDBI, MNDWI. Полученные результаты показывают, что растительный покров и водная поверхность связаны обратной корреляционной зависимостью с температурой поверхности, что выражается отрицательными величинами коэффициента корреляции. С другой стороны, застроенная территория имеет положительную корреляцию с температурой поверхности, что показывается положительными значениями коэффициента корреляции. В течение всего периода наблюдений коэффициент корреляции между температурой и плотностью городской застройки по индексу NDBI постоянно увеличивался и достиг наивысшего уровня в 2019 г. Другие индексы характеризовались относительным постоянством значений. Результаты исследования показывают возможность использования индекса NDBI для оценки плотности городской застройки и могут быть использованы в целях рационального управления землепользованием городских территорий.

*Ключевые слова:* температура поверхности Земли, урбанизация территории, дистанционное зондирование, Landsat, город Ханой

DOI: 10.31857/S0205961422030034

**ВВЕДЕНИЕ**

Быстрая урбанизация территории характерна для Вьетнама. Однако при отсутствии научного планирования урбанизация негативно сказывается на природных ресурсах и окружающей среде. Повышение температуры городской территории является примером такого негативного воздействия. Рост температуры городской поверхности в сравнении с прилегающей территорией, явление, известное как, “остров тепла”, является актуальной проблемой для большинства крупных городов. Основной причиной этого явления является изменение землепользования и земельного покрова в процессе урбанизации. Остров тепла образуется, когда солнечная радиация активно поглощается городской поверхностью и накапливается в поверхностном слое вместо того, чтобы отражаться обратно в атмосферу (Carnahan, Larson, 1990; Trinh, 2014). В настоящее время тепло-

вые острова отрицательно влияют на качество жизни в крупных городах мира.

Городской тепловой остров был впервые обнаружен в 1833 г. в Лондоне (Howard, 1833). В работе (Oke, 1979) выдвинута гипотеза о двух причинах возникновения городских островов тепла, связанных со свойствами поверхности территории и атмосферными условиями в городах.

В настоящее время для изучения этого феномена и наблюдения за ним используются средства дистанционного зондирования. Например, температура поверхности может быть получена на основе спутниковых датчиков Landsat, Aster, MODIS, регистрирующих изображения в тепло-инфракрасных каналах. По сравнению с традиционными методами, основанными на данных измерительных метеостанций, использование данных дистанционного зондирования имеет много пре-

имущества и широко используется в мире (Бондур, 2011).

В ряде работ тепловые инфракрасные изображения применялись для оценки температуры поверхности крупных городов. Выделяются два основных научных направления: изучение способов расчета температуры поверхности по тепловым инфракрасным каналам и изучение взаимосвязи между температурой поверхности и факторами земного покрова.

К первому направлению относятся исследования: (Alipour et al., 2004; Balling and Brazel, 1988; Cueto et al., 2007; Kumar et al., 2012; Trinh, 2014; Trinh and Vu, 2019; Yuan et al., 2007). В этих работах совершенствовались методики определения температуры поверхности по тепловым инфракрасным каналам Landsat TM, Landsat ETM+ на основе только первого теплового инфракрасного канала. В других исследованиях (Du et al., 2014; Rozenstein et al., 2014; Li and Jiang, 2018; Rongali et al., 2018) показано, что использование двух тепловых инфракрасных каналов Landsat 8, например, метод разделенного окна — split-window method, для определения температуры поверхности обладает большей точностью в сравнении с одноканальным методом.

Во втором направлении многими учеными доказана тесная взаимосвязь между температурой и типом подстилающей поверхности. Городская застройка с редкой растительностью характеризуется гораздо более высокими температурами поверхности, чем поверхность с густой растительностью (Tran et al., 2011; Boori et al., 2015; Bui, 2015; Bakar et al., 2016; Чинь и Заблоцкий, 2016; Nguyen and Pham, 2016; Pal and Ziaul, 2017; Anadababu et al., 2018; Guha et al., 2018).

Imran и др. (Imran et al., 2021) использовали данные тепловых ИК изображений Landsat для определения изменения земного покрова на температуру поверхности и оценки критерия теплового комфорта жителей города Дакка, Бангладеш. Показано, что за 27 летний период наблюдений произошло увеличение максимальной и средней температуры поверхности на 4.62 и 6.43°C, соответственно, в то время как изменение минимальной температуры поверхности было незначительным. Peng и др. (Peng et al., 2020) использовали данные Landsat 8 OLI\_TIRS для оценки температуры поверхности города Ханчжоу (Китай) с учетом влияния таких топографических факторов, как высота местности, наклон, ориентация склона относительно стран света. Результаты показали, что высота и наклон отрицательно коррелируют с температурой поверхности, причем все топо-

графические факторы связаны с температурой поверхности линейными зависимостями.

В работе Burnett и Chen (Burnett and Chen, 2021) использовались тепловые инфракрасные каналы спутников Landsat, Aster, MODIS для изучения взаимосвязи между температурой поверхности и воздухом на территориях с различной подстилающей поверхностью (город, растительность густая и редкая) в зимнее и летнее время. Результаты показали, что зимой температура поверхности и воздуха имеют более тесную линейную зависимость, чем летом, причем это наблюдалось для всех территорий с различными характеристиками поверхности. Aik и др. (Aik et al., 2020) изучали влияние изменения землепользования на температуру поверхности в нагорьях Камерон (Malaysia) в период с 2009 по 2019 г. на основе использования изображений Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI\_TIRS и MODIS. Исследование подтверждает влияние изменения землепользования/растительного покрова на температуру поверхности.

Данные тепловых инфракрасных датчиков дистанционного зондирования широко используются во Вьетнаме при изучении температуры поверхности больших городов. Tran и др. (Tran et al., 2011) проанализировали изменение температуры поверхности города Хошимин под воздействием урбанизации. Авторы применяли изображения Landsat для расчета индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и NDBI (Normalized Difference Built-up Index) и показали тесную корреляцию указанных индексов с температурой поверхности. Bui (Bui, 2015) изучал зависимость температуры поверхности города Ханой от плотности городской застройки. Результаты показали, что в районах, где плотность застройки превышает 80%, средняя температура достигла 37°C, что примерно на 5° выше, чем в районах с плотностью застройки менее 10%.

Trinh (Trinh, 2014) также использовал тепловые инфракрасные изображения Landsat для анализа распределения температуры поверхности в городе Ханой. Исследование Trinh (2014) показало, что температура поверхности в центральной части Ханоя с высокой плотностью зеленых насаждений значительно ниже, чем температура поверхности в новостройках на окраине города, для которых характерна низкая плотность древесных насаждений.

В данной работе анализируется взаимосвязь между температурой поверхности города Ханой и типом подстилающей поверхности, включая растительный покров, открытую водную поверх-

**Таблица 1.** Изображения LANDSAT, использованные в работе

№.	Спутник	Дата съемки
1	Landsat 5 TM	4 ноября 2000
2	Landsat 5 TM	9 октября 2005
3	Landsat 5 TM	8 ноября 2010
4	Landsat 8 OLI_TIRS	02 декабря 2013
5	Landsat 8 OLI_TIRS	30 октября 2016
6	Landsat 8 OLI_TIRS	03 декабря 2019

ность и застроенную территорию. Шесть многозональных изображений Landsat за период 2000–2019 гг. использовались для расчета температуры поверхности и оценки типа земного покрова. Зависимость между температурой и типом подстилающей поверхности оценивалась на основе анализа коэффициента корреляции между температурой поверхности и индексами NDVI, MDNWI, NDBI.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

##### *Исследуемая территория и данные дистанционного зондирования*

**Исследуемая территория.** Ханой – столица Социалистической Республики Вьетнам, простирается от 20°53′ до 21°23′ северной широты и от 105°44′ до 106°02′ восточной долготы. Площадь города составляет 3324.92 км<sup>2</sup>, население более 8 миллионов человек (по данным переписи 2019 г.). За последнее время землепользование и почвенный покров города очень быстро изменились, что отрицательно сказывается на окружающей среде. Сравнение температурных данных метеостанции в центральной части города (станция Ланг) и станций на окраинах (станция Ха Донг и Хоай Дык) показало, что с 1990–2000 гг., средняя температура в центральной части города увеличилась на 0.5°C, а окраинах всего на 0.1–0.2°C. В работе Le (Le, 2005) на основе данных наземных наблюдений убедительно показано существование “острова тепла” в городе.

В данной работе исследуемой территорией является центральная часть города, в которой расположены, как плотная городская застройка, так и зоны отдыха (рис. 1).

**Исходные данные.** Шесть многозональных изображений LANDSAT 5 TM и Landsat 8 OLI\_TIRS, полученных в период с 2000 по 2019 гг., использовались в работе (табл. 1 и рис. 2). Изображения LANDSAT были загружены с веб-сайта Геологической службы США (USGS – <http://glovis.usgs.gov>). Чтобы минимизировать влияние разнообразных погодных условий, изображения выбирались только для сухого сезона – с октября по декабрь месяц. Изображения Landsat в видимом и инфракрасном канале имеют пространственное разрешение 30 м. Пространственное разрешение тепловых инфракрасных каналов Landsat TM и Landsat 8 составляет 120 и 100 м соответственно. Этого вполне достаточно для проведения исследований на региональном масштабе и изучения оптических и тепловых свойств подстилающей поверхности города Ханой.

##### *Методика обработки данных*

Данные разновременных спутниковых изображений Landsat предварительно обрабатывались для устранения радиометрических и геометрических ошибок (Chavez, 1996), а затем переводились в местную систему координат VN-2000.

На следующем этапе индексы NDVI (Rouse et al., 1973), MNDWI (Xu, 2006) и NDBI (Zha et al., 2003) рассчитывались по следующим формулам:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}}, \quad (2)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}}. \quad (3)$$

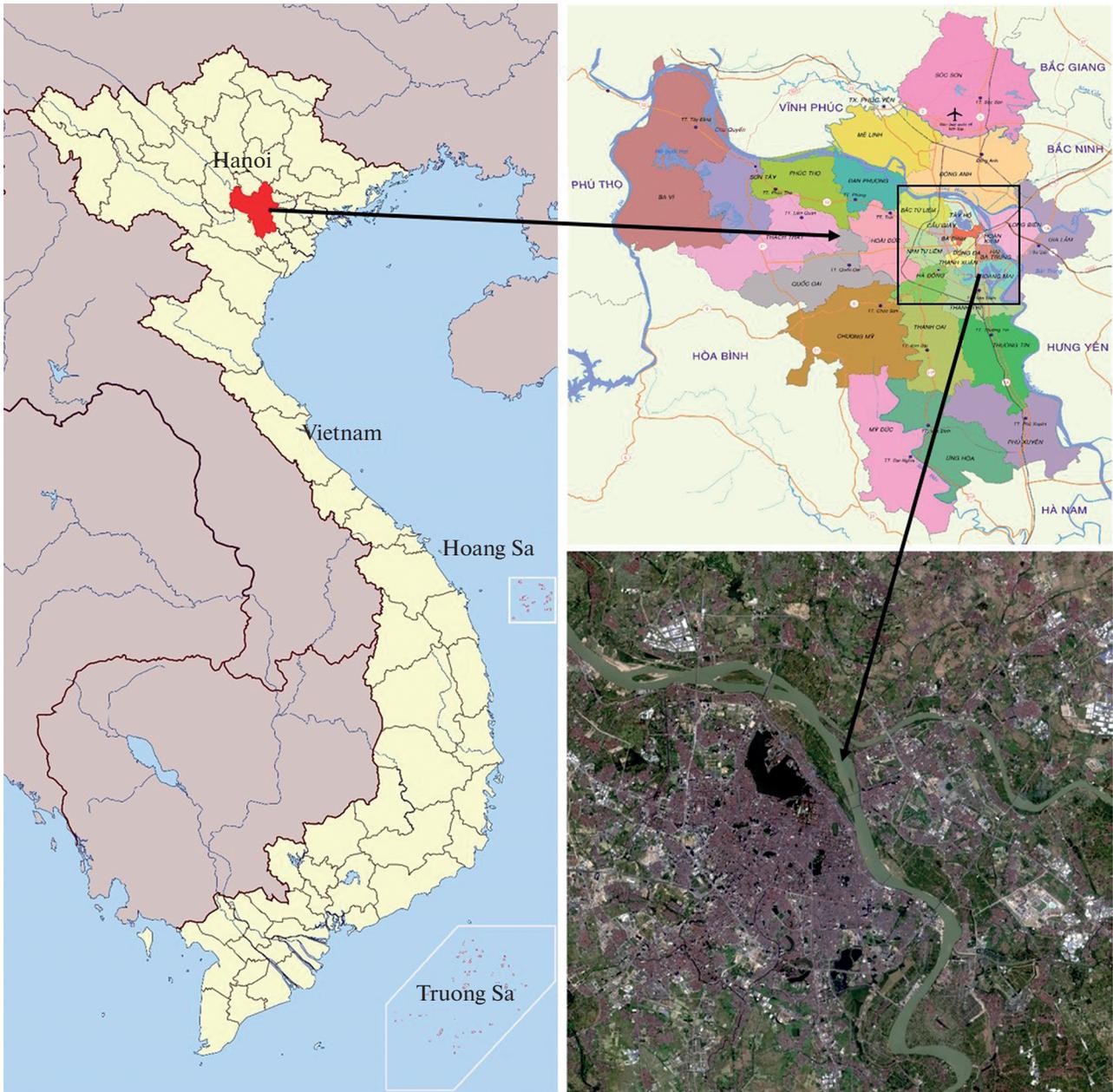


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории.

Тепловой инфракрасный канал (канал 6 изображения Landsat TM, канал 10 изображения Landsat 8) использовался для расчета яркостной температуры в соответствии с методом, предложенным NASA (<http://usgs.gov>):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

$T_B$  – яркостная температура (К);

$K_1$  и  $K_2$  – первая и вторая калибровочные константы, записанные в файле метаданных изображения Landsat.

Для расчета температуры поверхности использовался вегетационный индекс NDVI с учетом коэффициента излучения поверхности в соответ-

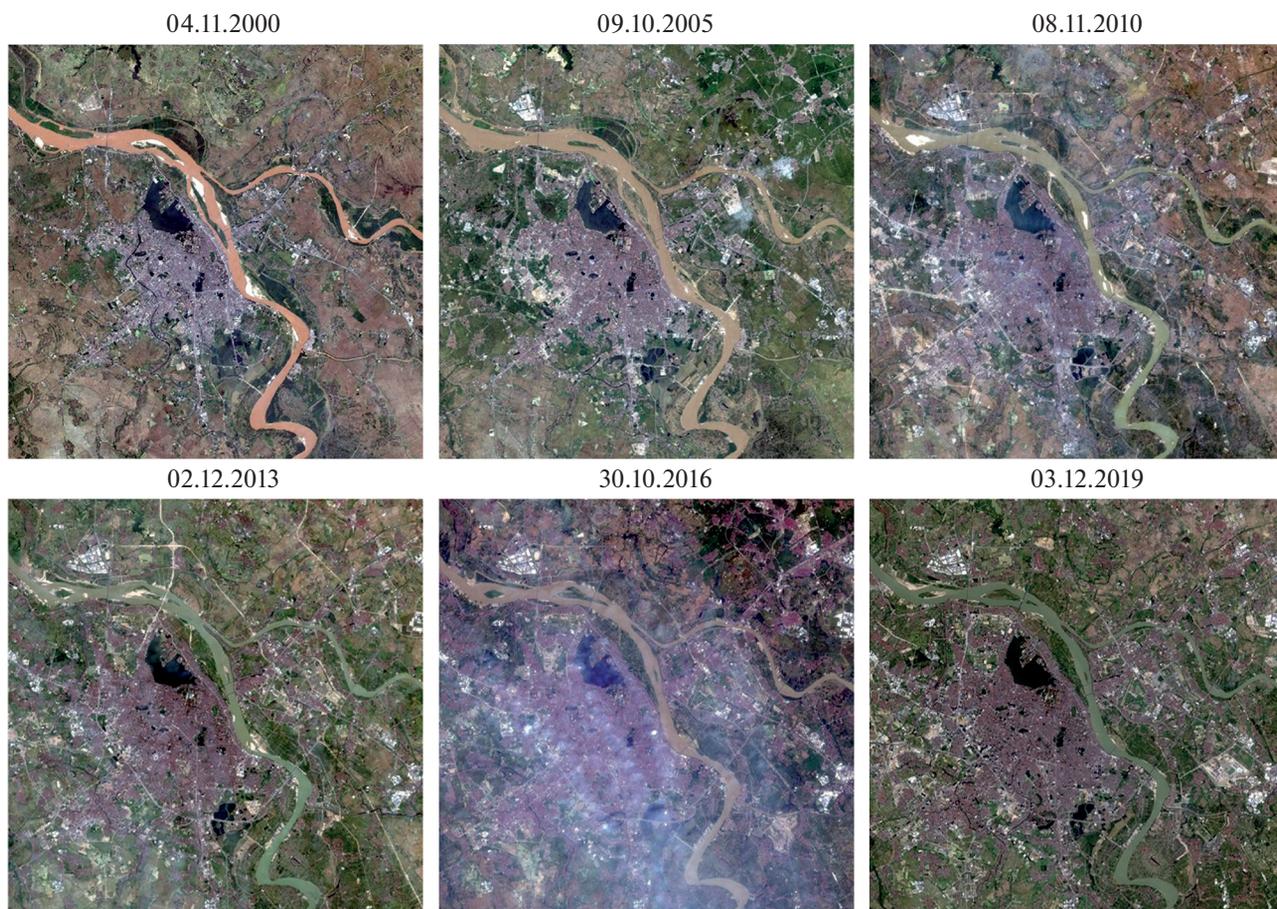


Рис. 2. Исходные изображения Landsat в видимом диапазоне.

ствии с методом, предложенным Valor и Caseless (Valor и Caseless, 1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) \quad (5)$$

$\varepsilon$  – коэффициент излучения от неоднородной поверхности;

$\varepsilon_v$  – коэффициент излучения сплошной растительности;

$\varepsilon_s$  – коэффициент излучения открытой почвы;

$P_v$  – отношение растительности и почвы в пикселе, рассчитанное по формуле:

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (6)$$

На последнем шаге осуществлялось вычисление поверхностной температуры (LST) по формуле:

$$LST = \frac{T_B}{1 + \frac{\lambda T_B}{\rho} \ln \varepsilon} \quad (7)$$

$\lambda$  – длина волны;  $\rho$  – константа ( $1.438 \times 10^{-2}$  м К).

После расчета температуры поверхности и индексов NDVI, MNDWI и NDBI рассчитывались коэффициенты корреляции между температурой поверхности и индексами NDVI, MNDWI, NDBI. Значение коэффициента корреляции позволяет оценить зависимость между температурой поверхности и такими типами земного покрова, как растительность, открытая водная поверхность, городская застройка.

Блок-схема алгоритма оценки взаимосвязи между температурой поверхности и типом подстилающей поверхности показана на рис. 3.

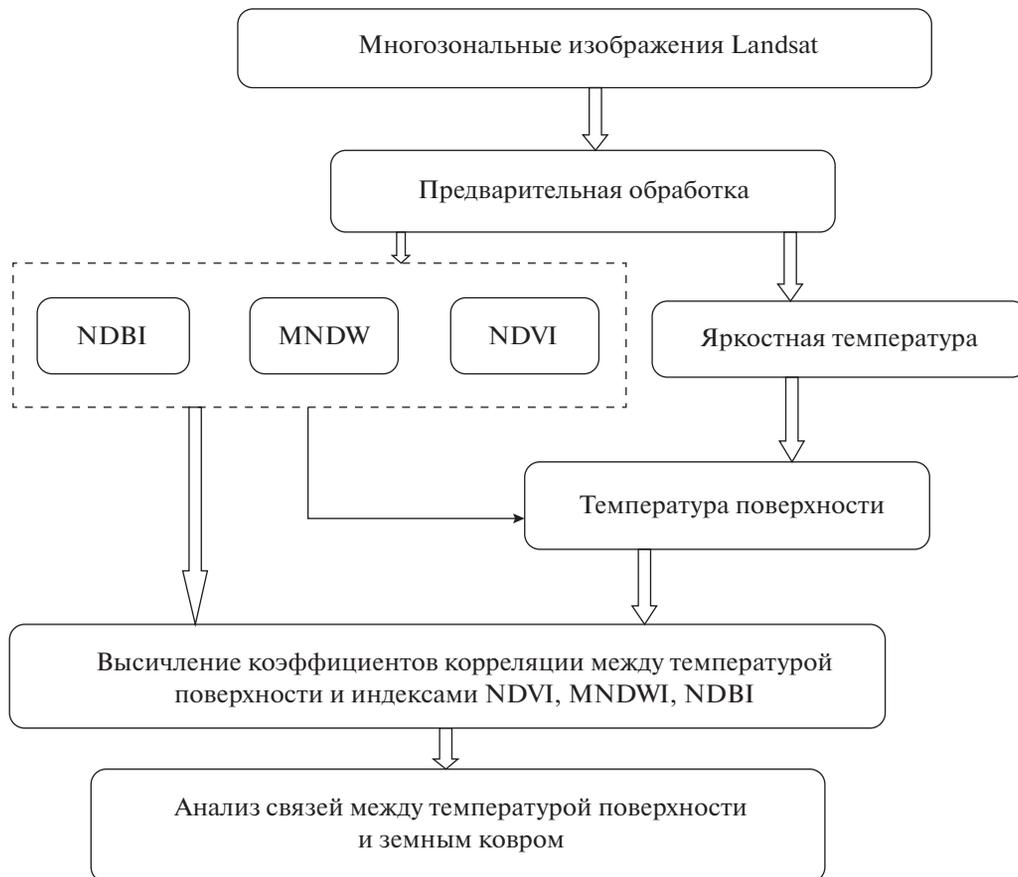


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки взаимосвязи между температурой поверхности и типом земного покрова.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Красный канал (канал 3 изображения Landsat TM, канал 4 изображения Landsat 8) и ближний инфракрасный канал (канал 4 изображения Landsat TM, канал 5 изображения Landsat 8) использовались для расчета индекса NDVI по формуле (1). Результаты расчета индекса NDVI исследуемой территории показаны на рис. 4. На изображении NDVI, растительность представлена яркими светлыми пикселями, темные пиксели – области с редкой растительностью или без нее. Как правило, индекс NDVI меняется от  $-1$  до  $1$ , при этом растительность характеризуется значениями индекса большими  $0.2$ .

Для расчета индекса MNDWI по формуле (2) использовался зеленый канал (канал 2 изображения Landsat TM, канал 3 изображения Landsat 8) и коротковолновый инфракрасный канал (канал 5 изображения Landsat TM, канал 6 изображения Landsat 8). Результаты расчета MNDWI исследуемой территории показаны на рис. 5. Можно видеть, что на изображении MNDWI водная поверхность представлена светлыми пикселями, а

почва и растительность – темными пикселями. Спектральная отражательная способность воды в зеленом канале выше, чем в коротковолновом инфракрасном канале, однако для растительности справедливо обратное отношение.

На рис. 6 показаны результаты расчета индекса NDBI по формуле (3) для исследуемой территории. Участки с городской застройкой представлены яркими светлыми пикселями. Сравнивая индексы *NDBI* можно сделать вывод о том, что площадь городской застройки, особенно в центральной части быстро увеличивалась с 2000 по 2019 г.

Температура поверхности территории города, рассчитанная по формуле (7) показана на рис. 7. Анализ полученных результатов показывает, что минимальная температура поверхности в городе за период 2000–2019 гг. существенно не менялась и составляла около  $17^{\circ}\text{C}$ . Однако максимальная температура постоянно увеличивалась и составляла  $40.3$ ,  $40.7$ ,  $40.9$ ,  $41.0$ ,  $41.9$  и  $42.6^{\circ}\text{C}$  в 2000, 2005, 2010, 2013, 2016 и 2019 гг. соответственно. Средняя температура городской поверхности в 2000, 2005, 2010, 2013, 2016 и 2019 гг. составляла  $27.1$ ,  $28.0$ ,

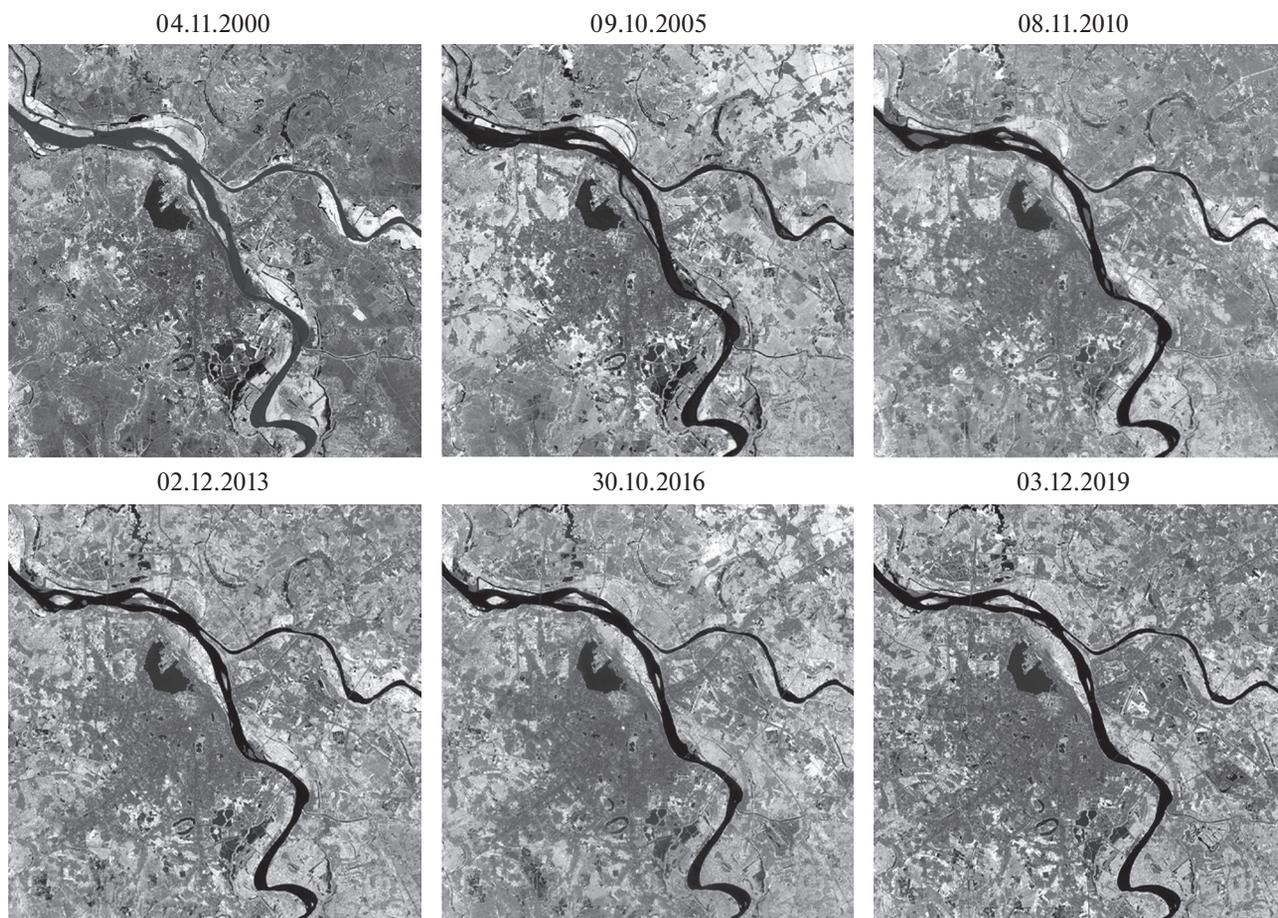


Рис. 4. Индексы NDVI территории Ханоя и его окрестностей.

28.3, 27.4, 32.1 и 33.4°C соответственно. Из рис. 6 и 7 следует, что высокая температура характерна для участков с высокой плотностью городской застройки и малопроницаемыми поверхностями. На участках, покрытых растительностью и открытой водной поверхностью температура поверхности намного ниже (показано темными пикселями).

Чтобы оценить изменение во времени индексов NDVI, MNDWI, NDBI и влияние различных типов покрова на температуру поверхности были рассчитаны коэффициенты корреляции между температурой и индексами. В табл. 2. представлены результаты расчета коэффициента корреляции между температурой поверхности и индексами для территории города.

Анализ результатов табл. 2 показывает, что температура поверхности положительно коррелирует с индексом NDBI (положительный коэффициент корреляции) и отрицательно коррелирует с индексом NDVI и MNDWI (отрицательный коэффициент корреляции). Увеличение площади

застроенной территории и связанное с этим увеличение температуры городской поверхности хорошо фиксируется индексом NDBI. Тепловой остров города за последнее время увеличился в размерах. С другой стороны, увеличение площади растительного покрова и площади открытой воды приводит к снижению температуры городской поверхности, что фиксируется индексами NDVI и MNDWI.

Температура поверхности максимально коррелирует с таким типом покрова, как “городская застройка”. Коэффициент корреляции между температурой поверхности и индексом NDBI в 2000, 2005, 2010, 2013, 2016 и 2019 гг. составлял соответственно 0.536, 0.627, 0.699, 0.807, 0.810 и 0.816. Эти значения намного превышают коэффициент корреляции между температурой и индексами NDVI и MNDWI. Растительный покров оказывал меньшее влияние на температуру поверхности, по сравнению с городской застройкой, но намного сильнее, нежели открытая водная поверхность.

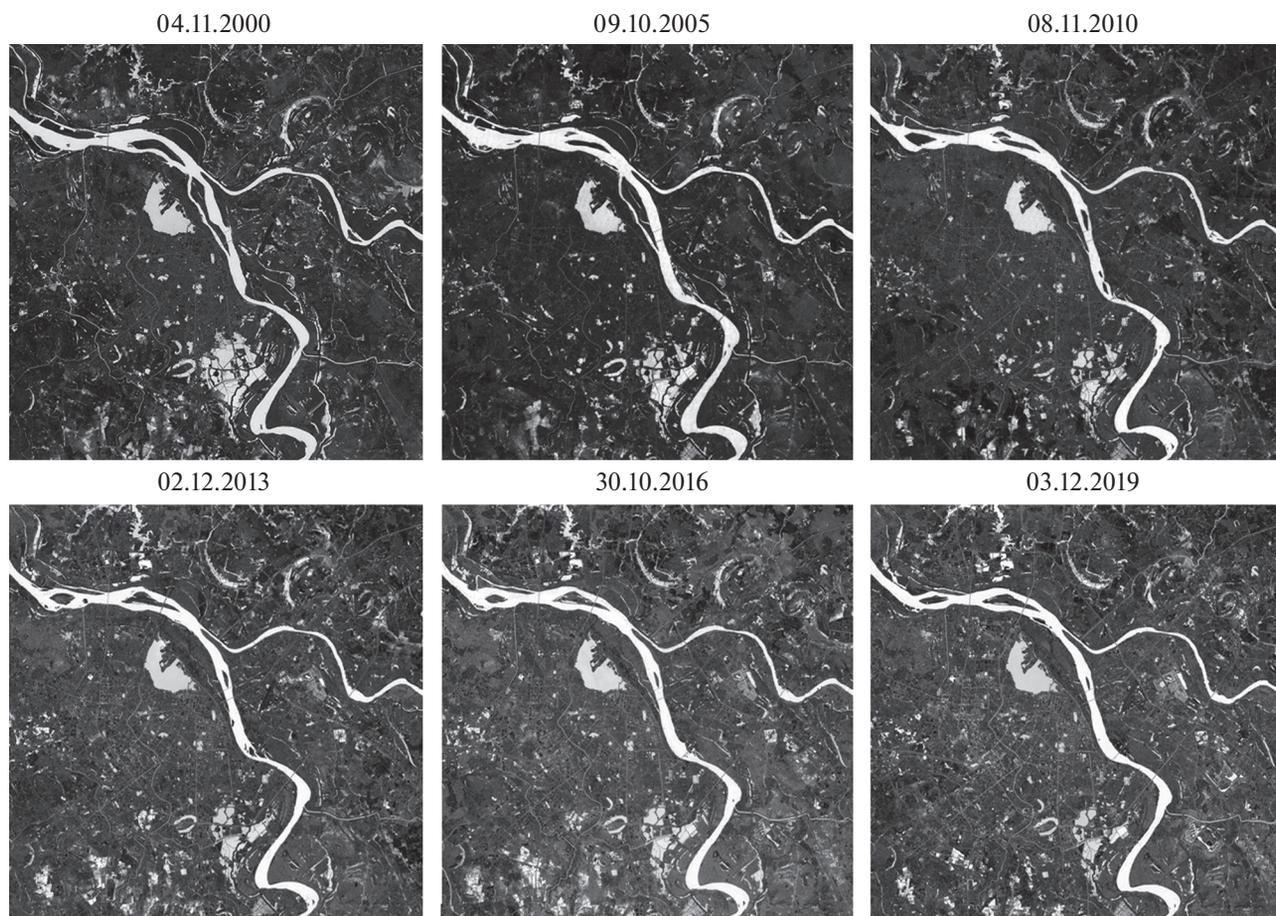


Рис. 5. Индексы MNDWI территории Ханоя и его окрестностей.

Установлено, что коэффициент корреляции между температурой поверхности и индексом NDBI постоянно увеличивался в течение периода

2000–2019 гг. вместе с ростом площади застроенных земель. Таким образом, можно утверждать, что процесс урбанизации, и связанное с ним уве-

Таблица 2. Коэффициент корреляции между температурой поверхности и индексами

Дата съемки	Средние значения коэффициента корреляции			
	NDVI	NDBI	MNDWI	
04.11.2000	–0.497	0.536	–0.186	
09.10.2005	–0.561	0.627	–0.099	
08.11.2010	–0.404	0.699	–0.334	
02.12.2013	–0.491	0.807	–0.203	Температура поверхности
30.10.2016	–0.439	0.810	–0.320	
03.12.2019	–0.593	0.816	–0.108	

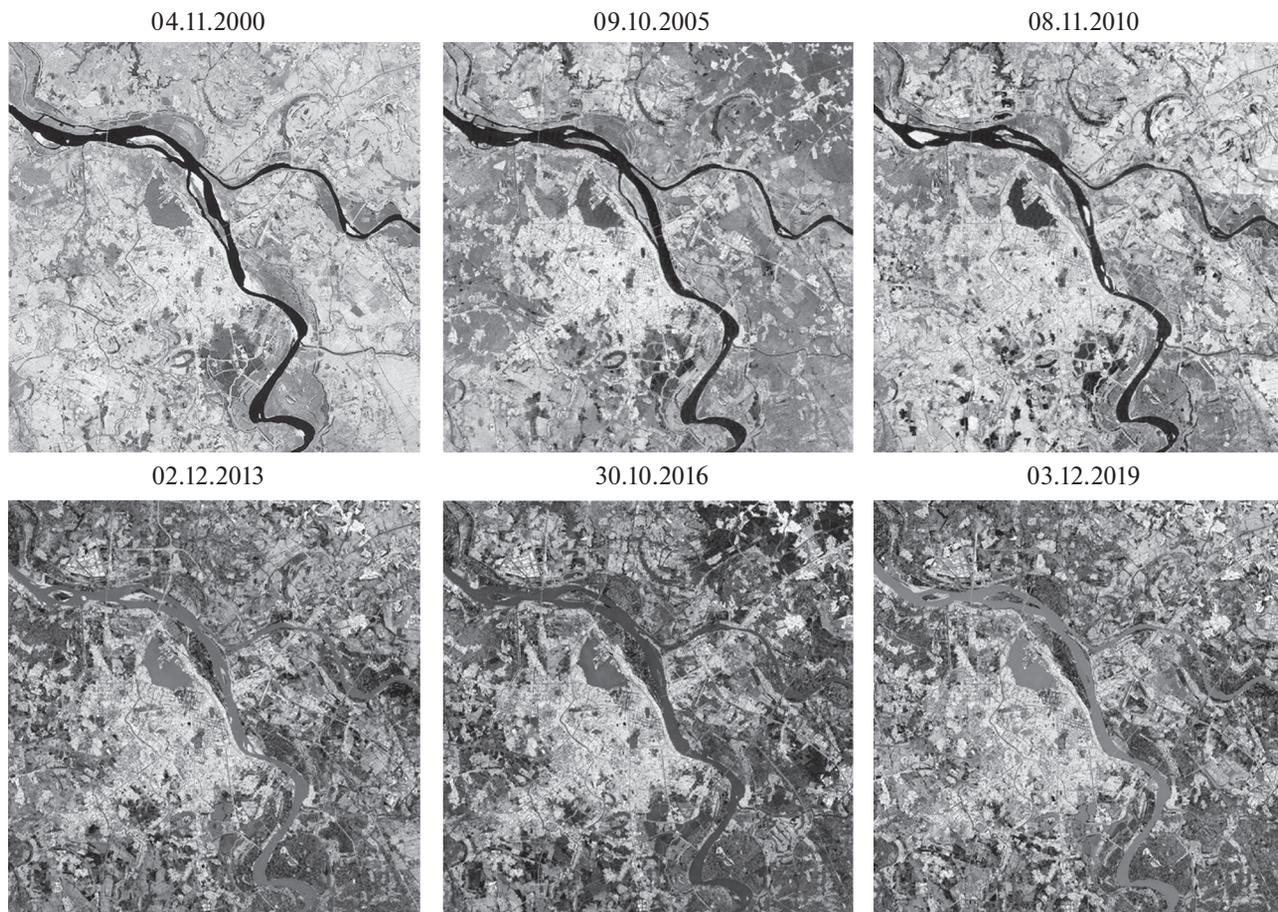


Рис. 6. Индексы NDBI территории Ханоя и его окрестностей.

личение площади застроенных земель, находит отражение в возрастании максимальных температур поверхности города.

### ВЫВОДЫ

Многозональные изображения Landsat являются ценным источником данных в изучении распределения температуры поверхности городской территории. Полученные результаты показали, что, как средние значения, так и распределение температуры на территории Ханоя с 2000 по 2019 г. претерпели значительные изменения. Площадь территории с высокой температурой поверхности быстро росла вместе с увеличением площади застройки. Чтобы оценить взаимосвязь между температурой поверхности и типом подстилающей поверхности в ходе активной урбанизации территории, в исследовании использовались спектральные индексы NDVI, MNDWI и NDBI и рассчитывался коэффициент корреля-

ции между температурой поверхности и этими индексами. Полученные результаты показали, что температура городской поверхности положительно коррелирует с индексом NDBI и отрицательно коррелирует с индексом NDVI и MNDWI. Коэффициент корреляции между температурой и индексом NDBI достигает максимального значения по сравнению с индексами NDVI и MNDWI. Можно утверждать, что увеличение площади застроенной территории оказывает наибольшее влияние на температуру поверхности по сравнению с другими факторами и лучше фиксируется индексом NDBI.

Полученные результаты и методика обработки данных дистанционного зондирования могут использоваться городскими и региональными властями в качестве источника информации для принятия обоснованных решений развития городской территории с целью уменьшения рисков резкого роста температуры окружающей среды.

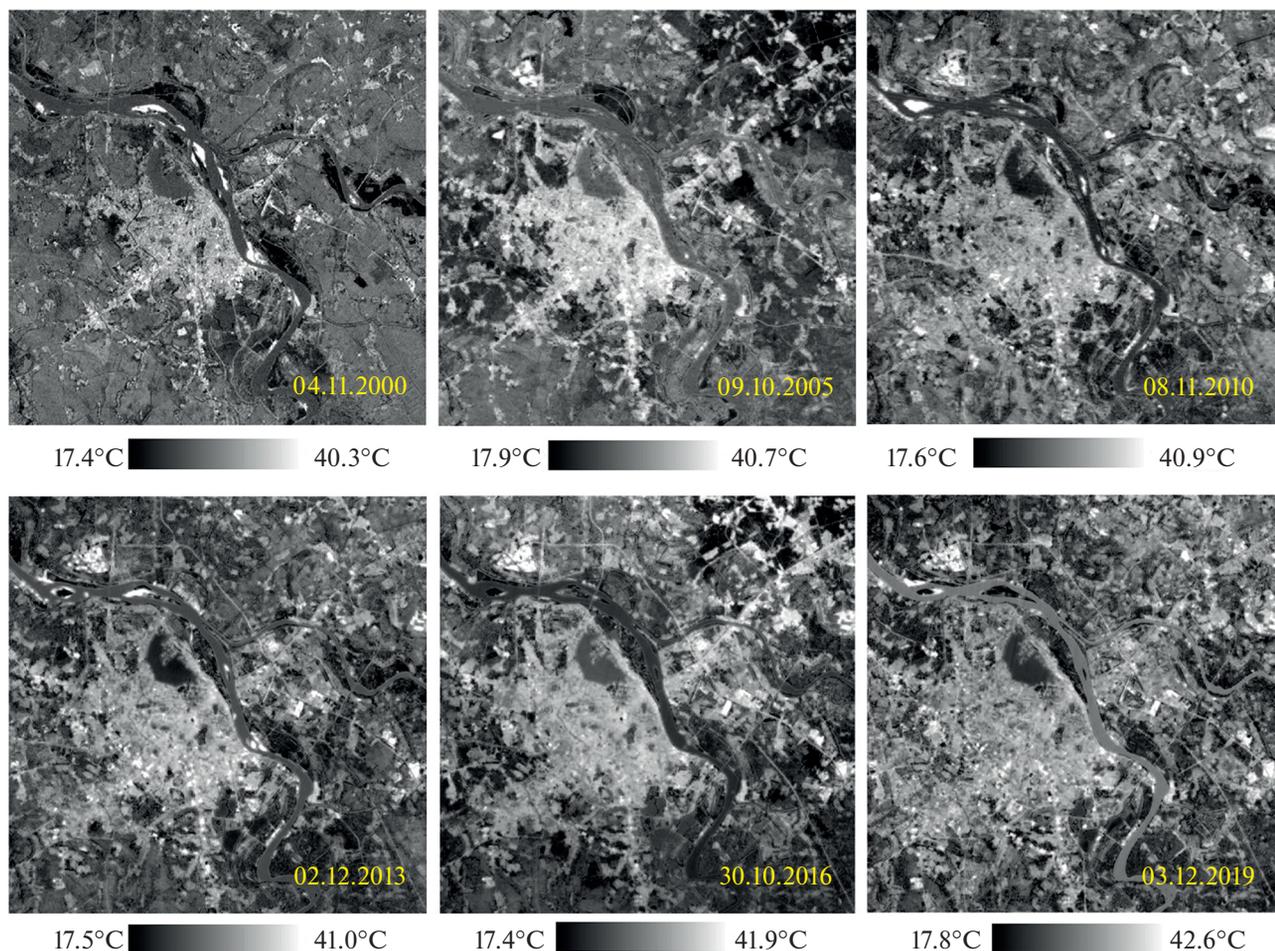


Рис. 7. Температура поверхности Ханоя и его окрестностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Чинь Л.Х., Заблоцкий В.Р.* Применение серии разновременной тепловой ИК съемки Landsat для выявления подземных пожаров в угольной шахте ХаньХоа, провинция Тхай Нгуен, Вьетнам // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 42–49.
- Aik D., Ismail M., Muharam F.* Land use/land cover changes and the relationship with land surface temperature using Landsat and MODIS imageries in Cameron Highlands, Malaysia // Land. 2020. V. 9. 372. <https://doi.org/10.3390/land9100372>
- Alipour T., Sarajian M., Esmaseily A.* Land surface temperature estimation from thermal band of LANDSAT sensor, case study: Alashtar city // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004. V. 38(4). P. 1–6.
- Anandababu D., Purushothaman B.M., Suresh B.S.* Estimation of land surface temperature using Landsat 8 data // International J. Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. 2018. V. 4(2). P. 177–186.
- Bakar S., Pradhan B., Lay U., Abdullahi S.* Spatial assessment of land surface temperature and land use/land cover in Langkawi Island // Earth and Environmental Science. 2016. V. 37. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/37/1/012064>
- Balling R.C., Brazel S.W.* High – resolution surface temperature patterns in a complex urban Terrain // Photogrammetric Engineering and Remote sensing. 1988. V. 54(9). P. 1289–1293.
- Boori M.S., Vozenilek V., Balter H., Choudhary K.* Land surface temperature with land cover classes in Aster and Landsat data // J. Remote Sensing & GIS. 2015. V. 4. P. 1–4. <https://doi.org/10.4172/2169-0049.1000138>
- Bui Q.T.* Urban heat island analysis in Ha Noi: examining the relationship between land surface temperature and impervious surface // Conference of Application of GIS. 2015. P. 674–677.
- Burnett M., Chen D.* The impact of seasonality and land cover on the consistency of relationship between air temperature and LST derived from Landsat 7 and MODIS at a local scale: A case study in southern Ontario // Land. 2021. V. 10. P. 672. <https://doi.org/10.3390/land10070672>
- Carnahan W.H., Larson R.C.* An analysis of an urban heat sink // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 33(1). P. 65–71.

- Chavez P. Image-based atmospheric corrections—revisited and improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. V. 62(9). P. 1025–1036.
- Cueto G., Jauregui Ostos E., Toudert D., Tejada Martinez A. Detection of the urban heat island in Mexicali and its relationship with land use // Atmosfera. 2007. V. 20(2). P. 111–131.
- Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Li J. Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data // International Geoscience Remote Sensing Symposium. 2014. P. 3578–3581. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947256>.
- Guha S., Govil H., Dey A., Gill N. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy // European J. Remote Sensing. 2018. V. 51(1). P. 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Imran H.M., Hossain A., Islam A., Rahman A., Bhuiyan Md., Paul S., Alam A. Impact of land cover changes on land surface temperature and human thermal comfort in Dhaka City of Bangladesh // Earth Systems and Environment. 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00243-4>
- Kumar K.S., Bhaskar P.U., Padmakumari K. Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using LANDSAT ETM+ image // International J. Engineering Science and Technology. 2012. V. 4(2). P. 771–778.
- Howard L. The climate of London, International Association for Urban Climate (IAUC). 1833. 285 p.
- Le D.Q. The formation of heat islands in the inner city of Hanoi // Vietnam J. Meteorology and Hydrology. 2005. 530. P. 44–46.
- Li S., Jiang G. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm // IEEE Access. 2018. V. 6, P. 18149–18162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2818741>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). LANDSAT data users' handbook. Available at <http://usgs.gov>. Accessed April 12, 2021.
- Nguyen D.T., Pham V.V. Application of remote sensing and GIS to study surface temperature changes of the urban districts in Hanoi during 2005–2015 period // Vietnam J. Agricultural Sciences. 2016. V. 14(8). P. 1219–1230.
- Oke T.R. Technical note No. 169: Review of urban climatology. 1979. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. 43 p.
- Pal S., Ziaul S. Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2017. V. 20(1). P. 125–145.
- Peng X., Wu W., Zheng Y., Sun J., Hu T., Wang P. Correlation analysis of land surface temperature and topographic elements in Hangzhou, China. Scientific Reports. 2020. V. 10. 10451.
- Rongali G., Keshari A.K., Gosain A.K., Khosa R. Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data // J. Geovisualization and Spatial Analysis. Published online 05 September 2018. 19 p.
- Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. 1973. Washington-DC. P. 309–317.
- Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y., Karnieli A. Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm // Sensors. 2014. V. 14. P. 5768–5780. <https://doi.org/10.3390/s140405768>
- Tran T.V., Hoang T.L., Le V.T. Research on the change of urban surface temperature under impact of urbanization in Hochiminh City by applying remote sensing method // Vietnam J. Earth Sciences. 2011. V. 33(3). P. 347–359.
- Trinh L.H. Studies of land surface temperature distribution using multispectral image Landsat // Vietnam J. Earth Sciences. 2014. V. 36(1). P. 82–89.
- Trinh L.H., Vu D.T. Comparison of single-channel and split-window methods for estimating land surface temperature from Landsat 8 data // VNU J. Sciences: Earth and Environmental Sciences. 2019. V. 35(2). P. 33–44.
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International J. Remote Sensing. 2006. V. 27(14). P. 3025–3033.
- Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 57. P. 167–184.
- Yuan F., Bauer M. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in LANDSAT imagery, Remote Sensing of Environment. 2007. V. 106. P. 375–386.
- Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International J. Remote Sensing. 2003. V. 24(3). P. 583–594
- Веб-сайт Геологической службы США: USGS – <http://glovis.usgs.gov>. Accessed April 12, 2021.

## The Relationship between the Land Surface Temperature and Land Cover Types, a Case Study in Hanoi, Vietnam

Le Hung Trinh<sup>1</sup>, V. R. Zablotskii<sup>2</sup>, I. V. Zenkov<sup>3, 4</sup>, Danh Tuyen Vu<sup>5</sup>, and Khanh Hoai Dao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

<sup>5</sup>Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam

This article presents the results of an assessment of the relationship between land surface temperature in the central part of Hanoi city and land cover/land use. The six Landsat TM and Landsat 8 images from 2000 to 2019 are used to calculate land surface temperature and land cover/land use factors, including NDVI (vegetation cover), NDBI (built-up land), MNDWI (water body), and then determine the correlation coefficient

between them. The results obtained show that vegetation cover and water body have an inverse correlation with land surface temperature, expressed in values of the correlation coefficient less than 0. Meanwhile, built-up land has a positive correlation with land surface temperature, which is shown in a value of the correlation coefficient greater than 0. The absolute value of the correlation coefficient between the land surface temperature and the built-up land reached the much higher in comparison with vegetation and water body, and increased steadily from 2000 to 2019. Results from the study can be used for land-use management and planning in urban areas.

*Keywords:* land surface temperature, land cover, urbanization, remote sensing, Landsat, Hanoi city

## REFERENCES

- Bondur V.G.* Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. <https://doi.org/10.1134/S0001433811090040>
- Trinh L.H., Zablotskii V.R.* Primenenie serii raznovremennoi teplovoi IK s'emki Landsat dlya vyyavleniya podzemnykh pozharov v ugol'noi shakhte Khan'Khoa, provintsiya Tkhai Nguen, V'etnam // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2016. № 5. P. 42–49. (In Russian).
- Aik D., Ismail M., Muharam F.* Land use/land cover changes and the relationship with land surface temperature using Landsat and MODIS imageries in Cameron Highlands, Malaysia // *Land*. 2020. V. 9. 372. <https://doi.org/10.3390/land9100372>
- Alipour T., Sarajian M., Esmaseily A.* Land surface temperature estimation from thermal band of LANDSAT sensor, case study: Alashtar city // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004. V. 38(4). P. 1–6.
- Anandababu D., Purushothaman B.M., Suresh B.S.* Estimation of land surface temperature using Landsat 8 data // *International J. Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2018. V. 4(2). P. 177–186.
- Bakar S., Pradhan B., Lay U., Abdullahi S.* Spatial assessment of land surface temperature and land use/land cover in Langkawi Island // *Earth and Environmental Science*. 2016. 37. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/37/1/012064>.
- Balling R.C., Brazel S.W.* High – resolution surface temperature patterns in a complex urban Terrain // *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*. 1988. V. 54(9). P. 1289–1293
- Boori M.S., Vozenilek V., Balter H., Choudhary K.* Land surface temperature with land cover classes in Aster and Landsat data // *J. Remote Sensing & GIS*. 2015. V. 4. P. 1–4. <https://doi.org/10.4172/2169-0049.1000138>
- Bui Q.T.* Urban heat island analysis in Ha Noi: examining the relationship between land surface temperature and impervious surface // *Conference of Application of GIS*. 2015. P. 674–677.
- Burnett M., Chen D.* The impact of seasonality and land cover on the consistency of relationship between air temperature and LST derived from Landsat 7 and MODIS at a local scale: A case study in southern Ontario // *Land*. 2021. V. 10. P. 672. <https://doi.org/10.3390/land10070672>
- Carnahan W.H., Larson R.C.* An analysis of an urban heat sink // *Remote Sensing of Environment*. 1990. V. 33(1). P. 65–71.
- Chavez P.* Image-based atmospheric corrections—revisited and improved // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1996. V. 62(9). P. 1025–1036.
- Cueto G., Jauregui Ostos E., Toudert D., Tejada Martinez A.* Detection of the urban heat island in Mexicali and its relationship with land use // *Atmosfera*. 2007. V. 20(2). P. 111–131.
- Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Li J.* Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data // *International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 2014. P. 3578–3581. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947256>
- Guha S., Govil H., Dey A., Gill N.* Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy // *European Journal of Remote Sensing*. 2018. V. 51(1). P. 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Imran H.M., Hossain A., Islam A., Rahman A., Bhuiyan Md., Paul S., Alam A.* Impact of land cover changes on land surface temperature and human thermal comfort in Dhaka City of Bangladesh // *Earth Systems and Environment*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00243-4>
- Kumar K.S., Bhaskar P.U., Padmakumari K.* Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using LANDSAT ETM+ image // *International J. Engineering Science and Technology*. 2012. V. 4(2). P. 771–778.
- Howard L.* The climate of London, International Association for Urban Climate (IAUC). 1833. 285 p.
- Le D.Q.* The formation of heat islands in the inner city of Hanoi // *Vietnam J. Meteorology and Hydrology*. 2005. 530. P. 44–46.
- Li S., Jiang G.* Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. // *IEEE Access*. 2018. V. 6, P. 18149–18162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2818741>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). LANDSAT data users' handbook. Available at <http://usgs.gov>. Accessed April 12. 2021.
- Nguyen D.T., Pham V.V.* Application of remote sensing and GIS to study surface temperature changes of the urban districts in Hanoi during 2005–2015 period // *Vietnam J. Agricultural Sciences*. 2016. V. 14(8). P. 1219–1230.
- Oke T.R.* Technical note No. 169: Review of urban climatology. 1979. World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland. 43 p.
- Pal S., Ziaul S.* Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*. 2017. V. 20(1). P. 125–145.

- Peng X., Wu W., Zheng Y., Sun J., Hu T., Wang P.* Correlation analysis of land surface temperature and topographic elements in Hangzhou, China. *Scientific Reports* 2020. V. 10. 10451.
- Rongali G., Keshari A.K., Gosain A.K., Khosa R.* Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data // *J. Geovisualization and Spatial Analysis*. Published online 05 September 2018. 19 p.
- Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. 1973. Washington-DC. P. 309–317.
- Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y., Karnieli A.* Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm // *Sensors*. 2014. V. 14. P. 5768–5780. <https://doi.org/10.3390/s140405768>
- Tran T.V., Hoang T.L., Le V.T.* Research on the change of urban surface temperature under impact of urbanization in Hochiminh City by applying remote sensing method // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2011. V. 33(3). P. 347–359.
- Trinh L.H.* Studies of land surface temperature distribution using multispectral image Landsat. // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2014. V. 36(1). P. 82–89.
- Trinh L.H., Vu D.T.* Comparison of single-channel and split-window methods for estimating land surface temperature from Landsat 8 data // *VNU J. Sciences: Earth and Environmental Sciences*. 2019. V. 35(2). P. 33–44.
- Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International J. Remote Sensing*. 2006. V. 27(14). P. 3025–3033.
- Valor E., Caselles V.* Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas // *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 57. P. 167–184.
- Yuan F., Bauer M.* Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in LANDSAT imagery, *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 106. P. 375–386.
- Zha Y., Gao J., Ni S.* Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // *International J. Remote Sensing*. 2003. V. 24(3). P. 583–94.
- USGS – <http://glovis.usgs.gov>. Accessed April 12. 2021.