ISSN 2619-1563 (Online)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ИЮЛЬ № 3 2020 АВГУСТ

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

д-р физ.-мат. наук *Ю.П. Ампилов*, д-р физ.-мат. наук *И.О. Баюк*, д-р физ.-мат. наук *М.Л. Владов*, д-р геол.-мин. наук *А.Ф. Глебов*, д-р физ.-мат. наук *В.Н. Глинских*, д-р техн. наук *Г.Н. Гогоненков*, д-р физ.-мат. наук *М.С. Денисов*, д-р техн. наук *И.Н. Ельцов*, д-р техн. наук *А.Ф. Еманов*, д-р техн. наук *А.П. Жуков*, д-р техн. наук *Ю.И. Колесников*, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук *В.А. Конторович*, чл.-к. РАН, д-р геол.- мин. наук *Ю.И. Кулаков*, д-р техн. наук *Э.Е. Лукьянов*, чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *П.С. Мартышко*, д-р физ.-мат. наук *Г.М. Митрофанов*, чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *И.Б. Петров*, д-р геол.-мин. наук *Е.В. Поспеева*, д-р геол.-мин. наук *В.С. Селезнев*, д-р геол.-мин. наук *В.Д. Суворов*, д-р техн. наук *А.П. Сысоев*, д-р техн. наук *Г.М. Тригубович*, д-р физ.-мат. наук *В.А. Чеверда*, д-р техн. наук *М.Б. Шнеерсон*, д-р техн. наук *Г.А. Шехтман*

Адрес редакции: 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
тел. 8(383) 363-67-14

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 3	Июль–сентябрь 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Мазов Н.А., Гуреев В.Н., Глинских В.Н. Библиометрический аспект выявления перспективных направлений в исследовательской организации: на примере наук о Земле 4

Гапеев Д.Н., Эпов М.И., Тишкин А.А., Фирсов А.П., Фролов Я.В., Останин В.А., Колесов А.С., Малетин Ю.Ю. Сплайн-аппроксимация неравноточных данных аэромагнитной съемки с применением БВС на пространственно-неоднородных сетях при решении задач археологической разведки 18

Кучай О.А. Горизонтальные смещения в зонах активных разломов Центральной Азии по данным о механизмах очагов землетрясений 31

Балков Е.В., Карин Ю.Г., Позднякова О.А., Шапаренко И.О., Гоглев Д.А. Аэрофотосъемка с БПЛА в поисковых задачах археологии: обзор и практические примеры 38

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2020

ISSN 2619-1563 (Online)

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 3	July–September 2020

CONTENTS

Mazov N.A., Gureev V.N., Glinskikh V.N. Bibliometric aspect of the detection of perspective areas in research organization: case study of Earth Sciences 4

Gapeev D.N., Epov M.I., Tishkin A.A., Firsov A.P., Frolov Ya.V., Ostanin V.A., Kolesov A.S., Maletin Yu.Yu. Spline approximation of unequal aeromagnetic survey data with the use of UAV on spatially inhomogeneous networks when solving problems of archaeological exploration 18

Kuchay O.A. The horizontal displacements in active fault zones in Central Asia based on data on the mechanisms of earthquake foci 30

Balkov E.V., Karin Yu.G., Pozdnyakova O.A., Shaparenko I.O., Goglev D.A. UAV photography in search problems of archeology: overview and practical examples 41

© Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2020

ISSN 2619-1563 (Online)

Геофизические технологии, № 3, 2020, с. 4–17 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619–1563–2020–3–4 УДК 550.8.005.11

БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ: НА ПРИМЕРЕ НАУК О ЗЕМЛЕ

Н.А. Мазов[1,2], В.Н. Гуреев[1,2], В.Н. Глинских[1,3]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
[2]Государственная публичная научно-техническая библиотека СО РАН,
630102, Новосибирск, ул. Восход, 15, Россия,
[3]Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: MazovNA@ipgg.sbras.ru

Выбор перспективных направлений научных исследований имеет важное значение для успешного развития и повышения конкурентоспособности научных организаций, университетов и страны в целом. Данная задача в основном решается с привлечением экспертного сообщества, однако использование предварительных результатов библиометрического анализа может оказать существенную поддержку в компетентном принятии решений экспертами. В статье на примере наук о Земле представлена библиометрическая модель выявления перспективных направлений в небольших исследовательских организациях, основанная на многофакторном анализе потока публикаций сотрудников, с использованием методов контент-анализа и анализа цитирований.

Перспективные направления; научный фронт; библиометрия; науки о Земле; классификация; Web of Science; KeyWords Plus

BIBLIOMETRIC ASPECT OF THE DETECTION OF PERSPECTIVE AREAS IN RESEARCH ORGANIZATION: CASE STUDY OF EARTH SCIENCES

N.A. Mazov[1,2], V.N. Gureev[1,2], V.N. Glinskikh[1,3]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
[2]State Public Scientific Technological Library SB RAS, Voskhod Str., 15, Novosibirsk, 630102, Russia
[3]Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MazovNA@ipgg.sbras.ru

Detection of perspective research areas in academic studies is of key importance for successful development and enhancement of the competitive performance of research organizations, universities, and the country. This task is usually solved by the expert community; however, the use of results of bibliometric analysis can give significant support to experts for informed decisions. The paper uses a case study of Earth Sciences to present a bibliometric model for the detection of perspective research in individual research organizations. The model is based on multiplex analysis of publications from the analyzed organization using content analysis and citation analysis.

Perspective research; research front; bibliometrics; Earth Sciences; classification; Web of Science; KeyWords Plus

© Н.А. Мазов, В.Н. Гуреев, В.Н. Глинских, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Выявление приоритетов и перспективных направлений является одной из основных задач при планировании исследовательской деятельности научной организации. Ее решение включает в себя широкий круг проблем, таких как обеспечение консенсуса между различными участниками (руководителями лабораторий, администрацией учреждения, вышестоящими инстанциями, грантовыми фондами) или оценка потенциала практического применения научных разработок [Тищенко, 2016; Мазов, Гуреев, 2020]. Задачи выбора перспективных направлений в значительной мере решаются методами экспертной оценки [Сазонов, 2016]. В то же время результаты предварительных библиометрических исследований дают экспертам много важной информации, которая во многом способствует более объективной итоговой оценке перспективности тех или иных исследований.

Отметим, что библиометрические методы особенно эффективны на уровнях структурных подразделений университетов или научных организаций – факультетов или лабораторий. Так, в работе [van Raan, 2003] предлагается подробный алгоритм тематического кодирования публикаций небольших исследовательских групп наиболее часто употребляемыми лексемами из метаданных этих публикаций для последующего выявления литературы аналогичной тематики на мировом уровне. Данный подход дает возможность картографировать тематические кластеры публикаций организации с выявлением схожих кластеров в мировой литературе, а также отчасти преодолевает терминологическую проблему устаревания классификаторов, позволяя обозначить те зарождающиеся научные области, которые еще не получили стандартизованных названий.

Метод лексического кодирования публикаций научной организации, основанная на нем формализация запроса и последующий поиск статей аналогичной тематики на международном уровне для выявления существующих научных направлений в организации, на наш взгляд, являются полезным направлением наукометрии, необходимым для оценки потенциала возможностей научной организации в решении новых задач, существующих в фундаментальной и прикладной науке.

Проведенный авторами обзор литературы показал, что если в мире интерес к разработке инструментов выявления перспективных направлений и научных фронтов неуклонно растет, то в России проблема поиска перспективных направлений, соответствующих научному потенциалу организации, пока не находит должного внимания у исследователей [Мазов и др., 2020]. Отмечается лишь несущественное число публикаций по теме, отсутствие собственных библиометрических систем для проведения исследований [Благинин и др., 2016], а представленные в РИНЦ метаданные публикаций трудно адаптировать к проведению подобных работ [Филимонова и др., 2014]. Таким образом, представленные ниже результаты, примененные к публикационному профилю Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН), являют собой одну из первых попыток библиометрического моделирования анализа научного потенциала в отдельной исследовательской организации, необходимого для выбора перспективных направлений ее развития, встроенного в тенденции мировой науки [Мазов и др., 2017; Мазов, Гуреев, 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактологической базой исследования стали публикации сотрудников ИНГГ СО РАН. На мезо- и микроуровнях отдельных организаций и лабораторий (в отличие от макроуровня, охватывающего

отдельные регионы и страны) вся необходимая библиографическая информация, особенно данные о сотрудниках и составе групп и программ, как правило, наиболее полно представлена внутри самих организаций [van Raan, 2003]. В нашем случае использовалась база данных «Труды сотрудников ИНГГ СО РАН» – библиографическая реферативная система, которая подготавливается информационно-аналитическим центром института с 2006 г. и включает в себя метаописания всех печатных и электронных публикаций сотрудников института в отечественной и иностранной литературе (http://ibc.ipgg.sbras.ru). Из этой базы данных были отобраны статьи за 10-летний период – с 2009 по 2018 гг., индексируемые в Web of Science Core Collection. Все они были распределены по тематическим группам в соответствии с Государственным рубрикатором научно-технической информации – ГРНТИ (http://grnti.ru).

Использованы два основных библиометрических метода – анализ цитирования и контент-анализ, совокупное применение которых показало хорошие результаты в наших предыдущих проектах при решении вопросов информационного сопровождения научных исследований [Gureev, Mazov, 2013].

Первая задача включала группировку публикаций организации по направлениям ее научной деятельности. Кластеризация может быть проведена по следующим признакам:

- деление по лабораториям;
- научные программы и проекты;
- тематические индексы и классификационные коды, указанные в публикациях (например, УДК, ГРНТИ, MSC classification, JEL classification и др.);
- классификаторы наукометрических баз данных (например, Web of Science Categories), что, однако, представляется менее точным подходом, поскольку эти классификаторы базируются на тематических направлениях журналов, но не публикаций [Wallace, Ràfols, 2018].

В настоящей работе тематическая кластеризация основана на рубрикаторе ГРНТИ, у которого есть преимущества перед вышеизложенными возможными подходами: наибольшее соответствие тематике научных исследований в российских организациях; относительная простота присвоения трехуровневых кодов; широкое применение классификатора на различных организационных этапах и в различных структурах, включая грантовые фонды, системы учета результатов научной деятельности, научные библиотеки, в том числе библиотеки отдельных организаций, что указывает на универсальность ГРНТИ для российского научного пространства.

Для ИНГГ СО РАН была сформирована отдельная база данных из 1176 научных публикаций, индексируемых в Web of Science Core Collection. На основе кодов ГРНТИ, которые присваиваются каждой публикации специалистами научной библиотеки ИНГГ СО РАН, весь публикационный поток был распределен по 18 крупным тематическим кластерам (рубрики ГРНТИ 1-го и 2-го уровней) и 59 узконаправленным кластерам (рубрики ГРНТИ 3-го уровня), которые необходимы для более детального анализа перспективных направлений. Кластеры с числом публикаций менее 10 не учитывались, поскольку часто эти малые области в профиле организации стоят достаточно далеко от ядерных областей института и являются периферийными, хотя результаты по этим направлениям могут иметь высокую научную ценность. Таким образом, был создан исследовательский публикационный профиль института (рис. 1).

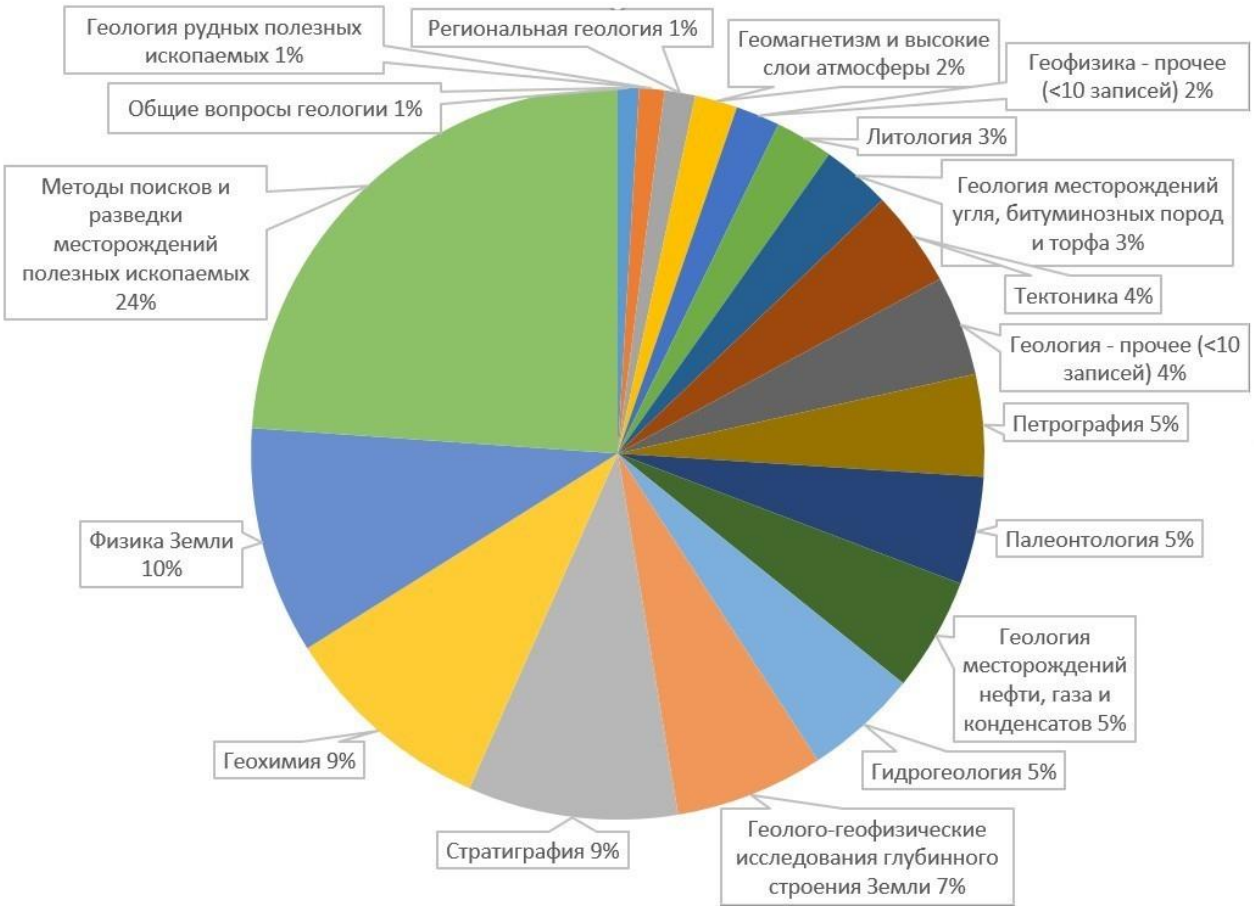

Рис. 1. Тематический публикационный профиль ИНГГ СО РАН на основе ГРНТИ

Следующей задачей стало извлечение из публикаций каждого кластера точных последовательностей ключевых слов, наиболее полно отражающих тематику исследований внутри группы. Для наибольшего соответствия после ряда экспериментальных исследований мы остановили свой выбор не на авторских ключевых словах, а на терминах KeyWords Plus из базы данных Web of Science. KeyWords Plus – алгоритмически назначаемые публикациям ключевые слова в базе данных Web of Science [Garfield, 1990; Garfield, Sher, 1993]. Они в наибольшей мере подходят для библиометрических исследований, относящихся к выявлению научных направлений или фронтов [Zhang et al., 2016; Vega-Muñoz et al., 2020].

KeyWords Plus представляют собой ранжированный нормированный список наиболее часто встречающихся одиночных терминов и словосочетаний из заглавий статей в пристатейных списках литературы анализируемых публикаций. Их использование предполагает синергическое использование этих двух основных подходов к выявлению научных фронтов – контент-анализа и исследования пристатейных списков литературы. Даже при субъективном предпочтении автором одной ссылки другому источнику тематика, выраженная в заглавии цитируемой статьи и поэтому попавшая в список KeyWords Plus, в большинстве случаев сохраняется. Это делает использование KeyWords Plus более предпочтительным перед использованием авторских ключевых слов.

Далее из последовательностей KeyWords Plus, присвоенных публикациям выделенных нами тематических групп, сформировались поисковые запросы в Web of Science Core Collection (число комплексных запросов соответствовало тематическим кластерам). При этом исключались строки с числом

ключевых слов менее трех, в основном включающие слова общего характера («анализ», «исследование», «изучение», «эксперимент» и др.) и географические термины, которые могут встречаться в ключевых словах публикаций по любой научной дисциплине. Исходя из того, что последовательность ранжированных по частоте встречаемости KeyWords Plus по сути являет собой краткий пересказ всей статьи, ее «генетический код», в поисковом запросе объективно отражается сама тематика исследований, содержащаяся в статьях. Схематически организация поискового запроса представлена на рис. 2.

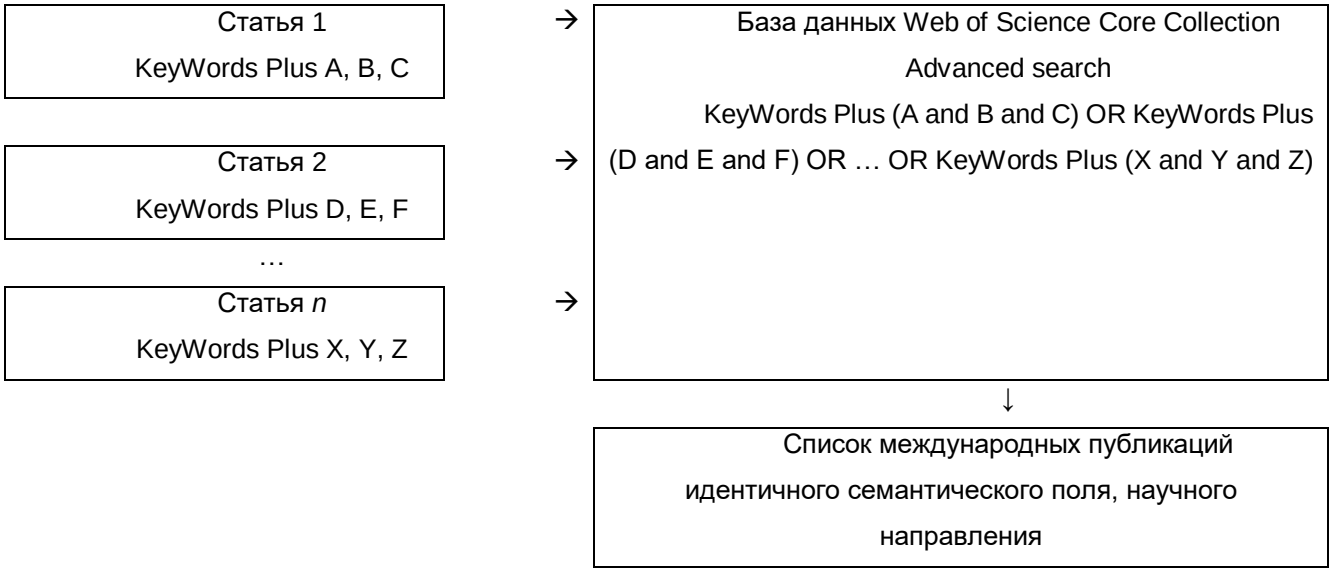

Рис. 2. Схема построения запроса по ключевым словам KeyWords Plus в базе данных Web of Science Core Collection

В результате поисковых запросов, соответствующих тематическим кластерам публикаций, для каждого из кластеров был получен набор международных публикаций со строго аналогичной тематикой. На следующем шаге сравнивались тематические кластеры публикаций ИНГГ СО РАН и группы международных публикаций строго аналогичной тематики для выявления перспективных направлений организации. На этом этапе применялся стандартный библиометрический инструментарий анализа публикационной активности и цитирований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом ограниченного объема статьи ниже представлены результаты библиометрического анализа для 10 ведущих научных направлений ИНГГ СО РАН (соответствующих 2-му уровню ГРНТИ) с числом публикаций более 40. Поскольку применяемые алгоритмы могут быть эффективно повторены на низшем, но самом важном уровне объединения – исследовательской группы или исследовательской программы [van Raan, 2003], по одному из направлений 2-го уровня ГРНТИ («Физика Земли», код 37.31) приведены дробные данные и по рубрике 3-го уровня («Физика недр Земли», код 37.31.15 и «Сейсмология», код 37.31.19). Исходные данные для представленного ниже библиометрического анализа приведены в табл. 1. Еще раз отметим, что выделенные нами кластеры публикаций хотя и отнесены к достаточно общим и широким научным направлениям, де-факто представляют собой узкоспецифические научные области, характерные для анализируемой организации, которые могут быть описаны либо облаком ключевых слов, либо усилиями предметных специалистов (что является самостоятельной

научной задачей). Сказанное относится и к полученным по нашим запросам группам международных публикаций.

На рисунке 3 представлено соотношение нормированного числа публикаций ИНГГ СО РАН к нормированному числу международных публикаций, что позволяет сравнить актуальность каждого из тематических направлений организации в мире. При нормировании были вычислены доли публикаций каждого направления в ИНГГ СО РАН и в мире от общего числа анализируемых публикаций.

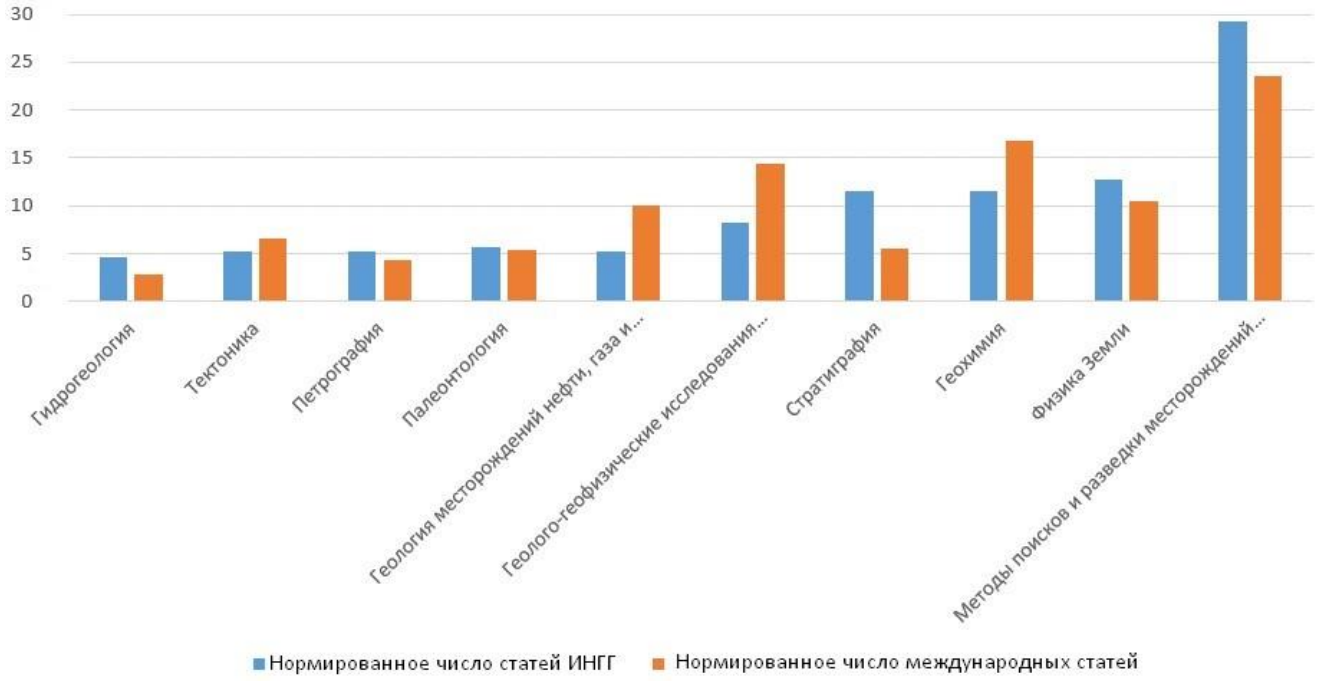

Рис. 3. Нормированное число публикаций по тематическим направлениям в ИНГГ СО РАН и в мире

Для направлений «Петрография» и «Палеонтология» видно следование разработок института в мировом русле. По направлениям «Гидрогеология», «Стратиграфия», «Физика Земли» и «Методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» в институте в среднем ведутся более интенсивные исследования, чем в целом в мире. С одной стороны, это может быть связано с несоответствием тематики текущим мировым трендам, с другой же, напротив, такая ситуация может быть показателем передовых позиций организации в мире. По направлениям тектоники; геологии месторождений нефти, газа и конденсатов, а также геохимии по относительному объему научной продукции видно отставание ИНГГ СО РАН от мировых тенденций. Отметим, что в области петрографии и геохимии в институте на протяжении исследуемого 10-летнего периода наблюдается спад научной продукции, показанный стрелками в табл. 1, тогда как в мире по всем анализируемым направлениям показан рост числа публикаций. По абсолютному числу публикаций мировой поток превосходит поток статей из ИНГГ СО РАН по разным направлениям от 1.5 до 5.5 раз, что указывает на высокую степень точности построения запросов по ключевым словам KeyWords Plus.

Для проведения качественного сравнения документопотока ИНГГ СО РАН с мировым потоком публикаций были задействованы методы анализа цитирования. В частности, для каждого тематического кластера рассчитывались доли статей в журналах 1–2 квартилей по базе данных Journal Citation Reports

(версии 2019 г.), среднее число цитирований одной статьи, индекс нецитируемости, а также индексы Хирша (рис. 4–7).

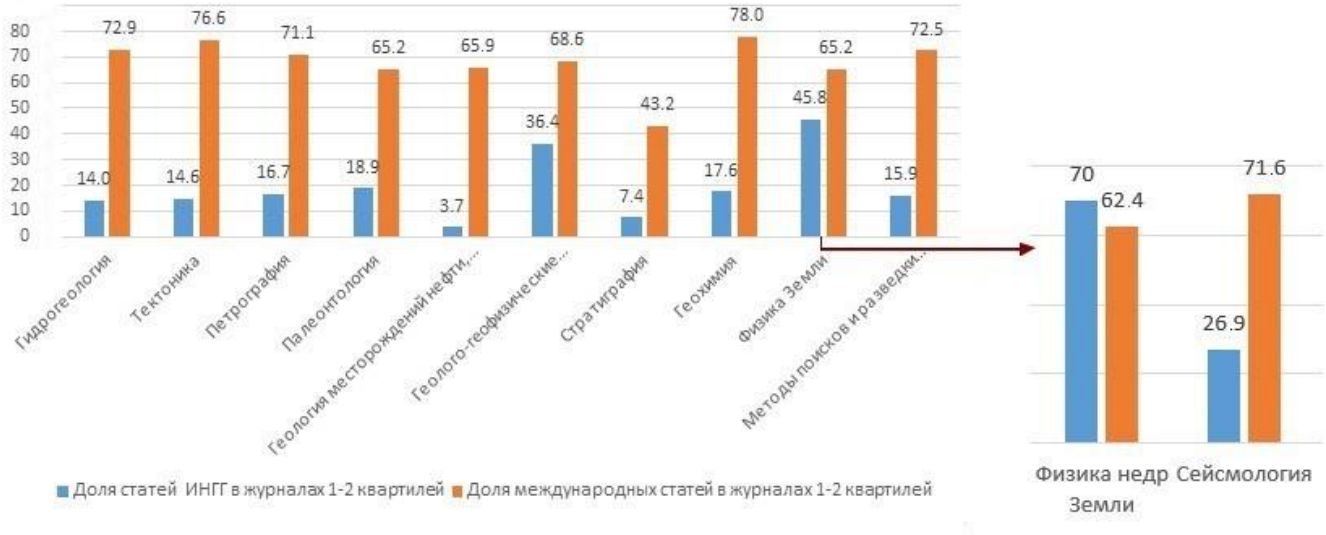

Рис. 4. Доля статей в журналах 1–2 квартиля по каждому тематическому кластеру публикаций в ИНГГ СО РАН и в мире (в процентах)

На рисунке 4 видно, что по всем тематическим группам на международном уровне публикации представлены в более авторитетных журналах, чем публикации института. Это тем более показательно, что в среднем журналы 1–2 квартилей публикуют существенно больше половины статей в рамках своих тематических направлений, хотя и включают ровно половину всех журналов своей группы. Так, по данным, которые мы получили из Journal Citation Reports версии 2019 г., по направлению Geosciences Multidisciplinary журналы 1–2 квартилей публикуют 65,2 % всех публикаций, издания по направлению Geochemistry & Geophysics – 69,4 % публикаций, а по направлению Geology – 79,5 % публикаций. Таким образом, на менее авторитетные журналы 3–4 квартилей приходится лишь незначительная часть публикаций. Это связано, в частности, с такими факторами, как меньшая периодичность, меньший объем, небольшой срок существования журнала и др.

Ситуация предпочтения авторами ИНГГ СО РАН менее авторитетных изданий в целом согласуется с публикационными моделями российских авторов, и во многом это связано с опубликованием результатов в российских журналах. Не всегда высокий уровень авторитетности российских журналов и их переводных версий в мировом публикационном пространстве – тема для отдельного исследования, выходящая за рамки настоящей работы. Относительно данных рис. 4 необходимо отметить, что по ряду направлений, таких как «Геолого-геофизические исследования глубинного строения Земли» и «Физика Земли», за которыми на 3-м месте следует «Палеонтология», доля публикаций в рейтинговых журналах достаточно высока, что позволяет сделать вывод о лидировании этих направлений в институте. Более подробный анализ направления «Физика Земли», куда по 3-му уровню ГРНТИ входят направления «Физика недр Земли» и «Сейсмология», показывает, что исследования по физике недр Земли, проводимые в институте, опубликованы в высокорейтинговых журналах даже в большем объеме, чем в среднем по миру – 70 % статей отражено в журналах 1 или 2 квартилей, тогда как в среднем по миру лишь в 62 % случаев статьи публикуются в наиболее рейтинговых изданиях.

Таблица 1. Библиометрические показатели публикационной активности сотрудников ИНГГ СО РАН по 10-ти наиболее крупным научным направлениям и показатели соответствующих тематических кластеров публикаций в мире за период 2009–2018 гг.

Тематические направления по ГРНТИ, код рубрики	Статьи ИНГГ СО РАН						Мировой поток статей (за вычетом публикаций ИНГГ СО РАН)					
	Число статей в Web of Science CC	Число статей в журналах 1–2 квартилей	Число нецит-мых статей	Число цит-ний	Среднее число цитирований 1 статьи	h-индекс	Число статей в Web of Science CC	Число статей в журналах 1–2 квартилей	Число нецит-мых статей	Число цит-ний	Среднее число цитирований 1 статьи	h-индекс
1. Гидрогеология, 38.61	43 ↑	6	3	358	8,33	10	85 ↑	62	2	1297	15,26	22
2. Тектоника 38.17	48 ↑	7	5	522	10,88	13	192 ↑	147	3	7083	36,89	46
3. Петрография 38.37	48 ↓	8	2	509	10,60	13	128 ↑	91	4	1736	13,56	23
4. Палеонтология 38.31	53 ↑	10	5	594	11,21	14	158 ↑	103	5	2371	15,01	24
5. Геология месторождений нефти, газа и конденсатов, 38.53	54 ↑	2	10	301	5,57	10	296 ↑	195	18	4486	15,16	31
6. Геолого-геофизические исследования глубинного строения Земли, 38.19	77 ↑	28	4	872	11,32	15	423 ↑	290	34	6684	15,80	41
7. Стратиграфия, 38.29	108 ↑	8	10	875	8,10	15	162 ↑	70	11	2538	15,67	28
8. Геохимия, 38.33	108 ↓	19	12	1181	10,94	15	492 ↑	384	14	11712	23,80	51
9. **Физика Земли, 37.31**	118 ↑	54	10	1550	13,14	21	310 ↑	202	13	5745	18,53	40
9.1. Сейсмология, 37.31.19	67 ↑	18	9	399	5,96	10	261 ↑	187	16	4852	18,59	34
9.2. **Физика недр Земли, 37.31.15**	50 ↓	35	1	1150	23,00	19	234 ↑	146	7	4911	20,99	38
10. Методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, 38.57	271 ↑	43	41	1717	6,34	19	694 ↑	503	44	12166	17,53	48

Примечания: Стрелками показаны тенденции роста или спада числа публикаций за анализируемый период. Жирным шрифтом выделены научные направления ИНГГ СО РАН, результаты которых соответствуют мировому уровню или превосходят его.

Напротив, направления «Геология месторождений нефти, газа и конденсатов» и «Стратиграфия», особенно с учетом высокой публикационной активности (рис. 3), по-видимому, нуждаются в большем представлении в основных изданиях по своему направлению.

Сделаем оговорку, что данные рис. 4 следует рассматривать лишь как показатель степени представленности результатов ИНГГ СО РАН международному научному сообществу, как индикатор «видимости» статей, которые с намного большей вероятностью будут заметны, восприняты и использованы, если будут отражены в наиболее рейтинговых, а потому наиболее читаемых журналах. В соответствии с принципами Лейденского манифеста для наукометрии [Hicks et al., 2015], а также с положениями Сан-Францисской декларации об оценке научных исследований [San Francisco Declaration, 2013] следует избегать экстраполирования рейтинга и качества журнала на качество публикуемых в нем материалов. Более точно о ценности научных работ, косвенно указывающих на их качество [Лазарев, 2018], может сказать такой показатель, как усредненное число цитирований одной статьи (рис. 5).

Рис. 5. Среднее число цитирований 1 статьи ИНГГ СО РАН в сравнении со среднемировым значением

По числу наиболее цитируемых областей в ИНГГ СО РАН лидирующие позиции занимают «Физика Земли», «Геолого-геофизические исследования глубинного строения Земли» и «Палеонтология», которые поэтому можно считать ведущими научными направлениями института. Отметим, что эти же направления занимают первые три позиции по числу публикаций в лучших журналах, причем связь между этими показателями может быть взаимозависимой. С одной стороны, публикации в более заметных журналах быстрее набирают цитирования [Hsu, Huang, 2012], с другой – процесс отбора рукописей в эти издания более строгий, следовательно, туда попадают более качественные исследования. Дробный анализ направления «Физика Земли», как и в случае с анализом научной продуктивности, показал, что лидирующим направлением в институте является «Физика недр Земли», где средняя цитируемость одной публикации превышает среднемировое значение: 23 цитирования в ИНГГ СО РАН в сравнении с 21 в мире.

Данные по мировому уровню цитируемости с определенными оговорками можно использовать для корректировки приоритизации исследований в институте: наибольший международный интерес исследователей, судя по числу цитирований, в настоящее время вызывают работы по тектонике, геохимии и методам поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.

При анализе цитирования часто за рамками рассмотрения оказывается такой ценный, на наш взгляд, показатель, как уровень нецитируемости, хотя ряд исследователей указывает на его значимость в оценке востребованности результатов научной деятельности [Campbell, 2008; Egghe, 2008; Hsu, Huang, 2012]. На рис. 6 представлено соотношение уровня нецитируемости по соответствующим тематическим направлениям для статей ИНГГ СО РАН и мирового потока публикаций.

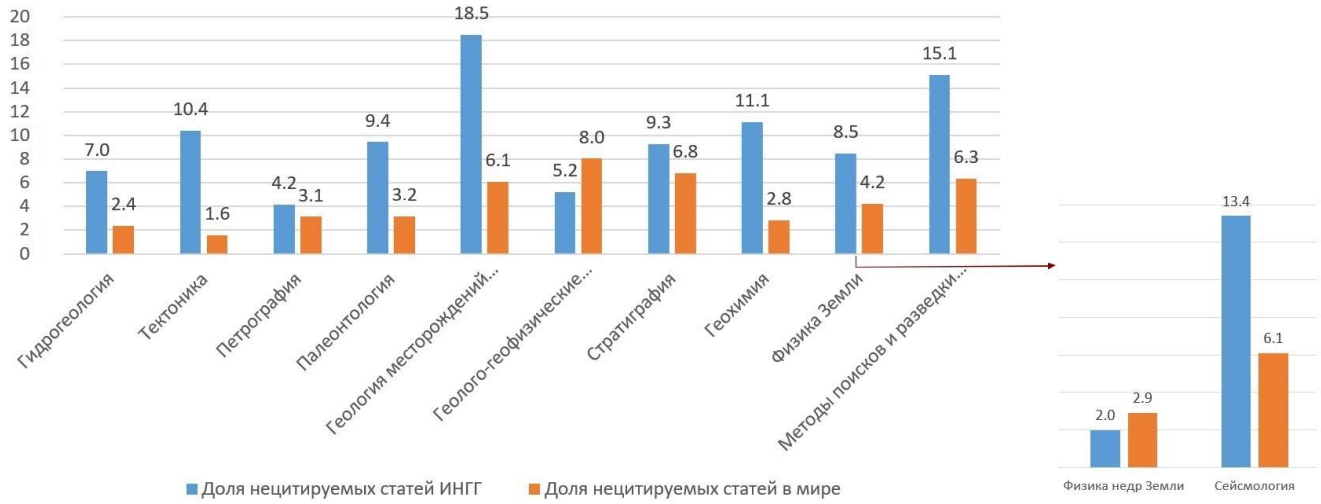

Рис. 6. Уровень нецитируемости статей ИНГГ СО РАН и мирового потока публикаций (в процентах)

По уровню нецитируемости наилучшие позиции отмечены по направлению «Геолого-геофизические исследования глубинного строения Земли», где в целом он ниже среднемирового уровня. Дробный анализ направления «Физика Земли» так же, как и в предыдущих случаях, подтверждает лидирующее положение публикаций по физике недр Земли, где фактор нецитируемости ниже среднемирового значения (2 % для публикаций ИНГГ СО РАН против 2,9 % публикаций по этому же направлению в мире). Напротив, в направлении «Геология месторождений нефти, газа и конденсатов» наблюдается высокая доля нецитируемых работ, что, кроме прочего, может быть связано с наиболее низкой долей публикаций в рейтинговых журналах (рис. 4).

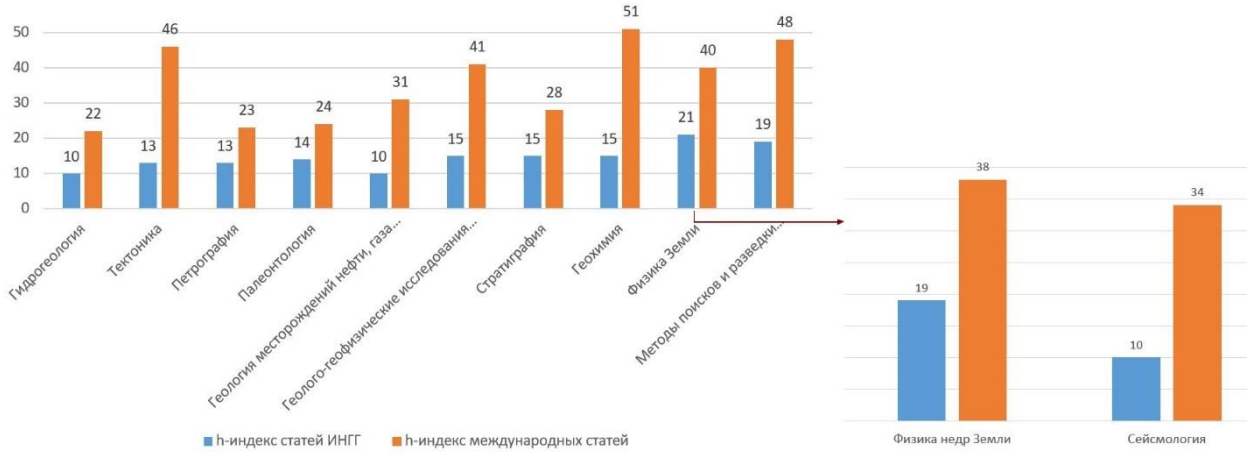

Рис. 7. h-индекс статей ИНГГ СО РАН и мирового потока публикаций

Данные рис. 7 показывают превалирование индекса Хирша у международных статей над таковым у статей ИНГГ СО РАН по всем тематическим направлениям. В целом это объясняется бóльшим числом публикаций на международном уровне. Сравнительный анализ показывает, как и в случае с усредненной цитируемостью, наибольший международный интерес к направлениям тектоники, геохимии и методам поиска и разведки месторождений полезных ископаемых. В институте же, как и по уже проанализированным показателям, на лидирующем месте оказываются исследования по физике Земли, при этом дробный анализ направления вновь указывает на доминирующее положение публикаций по физике недр Земли. Примечательна ситуация с направлением «Методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых»: если по усредненному числу цитирований и уровню нецитируемости это направление не демонстрировало существенного превосходства над другими направлениями, то индекс Хирша публикаций оказывается достаточно высоким и занимает 2-е место в институте. Следовательно, была опубликована небольшая группа высокоцитируемых статей, которая обусловила высокое значение индекса Хирша.

Комплексный анализ данных показывает, что наиболее развитое научное направление в ИНГГ СО РАН представлено публикациями по физике Земли. Более детальный анализ выявил, что входящее в него направление «Физика недр Земли» превышает по основным библиометрическим характеристикам среднемировые значения. При одновременном несущественном спаде в публикационной активности по этому направлению (табл. 1) отмечается качественный рост исследований, выраженный в высоких показателях цитируемости. Примечателен существенный отрыв этого направления от смежного направления сейсмологии, что указывает на неоднородность уровня проводимых в организации исследований по физике Земли. Перспективным является также направление «Геолого-геофизические исследования глубинного строения Земли». Здесь, напротив, библиометрические характеристики указывают на однородность и непротиворечивость показателей, что говорит о приблизительно равном уровне исследований в рамках различных узких тематик этого направления.

Высокий индекс Хирша в направлении «Методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» при более низких прочих показателях указывает на формирование авторитетного ядра исследователей, которым удалось опубликовать ряд высокоцитируемых публикаций. Отметим, что данное направление по числу публикаций является ведущим в институте и одним из наиболее разрабатываемых в мире. Особый интерес представляет то, что по этой тематике в ИНГГ СО РАН ведут исследования сразу несколько отделений различной специализации, с использованием собственных подходов и инструментов. Предварительный анализ показал лидирование подразделов «Разведочная геофизика» (код 38.57.23) и «Геофизические исследования в скважинах» (38.57.25), последующее рассмотрение которых может дать более подробную информацию об их перспективности и соответствии мировому уровню.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированные в работе подходы к выявлению перспективных направлений исследований научной организации основаны на комплексном сравнительном анализе тематических групп публикаций учреждения с группами международных публикаций строго аналогичной тематики. Оригинальность предложенного подхода заключается в формировании запросных строк, позволяющих получить наиболее близкие по тематике группы международных публикаций. Представленный набор показателей, характеризующих видимость публикаций организации международному научному

сообществу и их ценность для последующего развития науки может быть расширен, что сделает результаты анализа более глубокими и применимыми к узким тематическим направлениям.

На примере публикационного профиля ИНГГ СО РАН показаны возможные библиометрические подходы к определению перспективных научных направлений, которые могут лечь в основу последующей экспертной оценки. В то же время необходимо отметить некоторые ограничения предложенной модели. Во-первых, она основана на статьях в рецензируемых журналах, которые, безусловно, не исчерпывают коммуникационный ландшафт науки и даже не во всех дисциплинах являются основным каналом трансляции результатов исследований [Priem et al., 2012]. Во-вторых, высокоцитируемые журналы (как правило, 1–2 квартилей) могут иметь тенденцию к публикациям определенной тематики в ущерб другим, а авторы, следовательно, могут модифицировать свои исследования для опубликования именно в этих журналах. Это может привести к смещению в выявлении высокоцитируемых направлений библиометрическими методами. В-третьих, значимое влияние на обнаружение перспективных направлений оказывают и сами базы данных для выборки публикаций [Åström, 2007], в нашем случае – Web of Science Core Collection. Кроме задержки при индексировании подобные системы имеют ограничения по региональному и языковому охвату источников; не всегда высокой является точность библиографических метаданных [Selivanova et al., 2019]. Для более точного анализа необходимо включение дополнительных пластов научной информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам за содействие в интерпретации полученных результатов и ценные замечания терминологического характера. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-011-00531.

ЛИТЕРАТУРА

Благинин В.А., Карх Д.А., Сулимин В.В. О необходимости использования исследовательских фронтов в научной деятельности // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 12 (66). – С. 135–137.

Лазарев В.С. «Цитируемость нобелевского класса» и понятия, выражающие характеристики и свойства цитируемых научных документов / под ред. проф. В.М. Тютюнника. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена; Гамбург; Стокгольм; Бауке: изд-во МИНЦ «Нобелистика», 2018. – 70 с.

Мазов Н.А., Гуреев В.Н. Определение позиций научных направлений организации в мире: библиометрический аспект // Сборник докладов 23-й Международной конференции и выставки «Информационные технологии, компьютерные системы и издательская продукция для библиотек» (LIBCOM-2019) (18–22 ноября 2019 г., Суздаль). – М.: ГПНТБ России, 2019. – С. 24–26, doi: 10.33186/978-5-85638-221-0-2019-24-26.

Мазов Н.А., Гуреев В.Н. Проблемные аспекты при выявлении приоритетных направлений научных исследований // Управление наукой: теория и практика. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 37–51, doi: 10.19181/smtp.2020.2.3.2.

Мазов Н.А., Гуреев В.Н., Эпов М.И. Результаты наукометрического анализа мирового потока публикаций в области скважинной геофизики // Каротажник. – 2017. – № 12. – С. 65–86.

Мазов Н.А., Гуреев В.Н., Глинских В.Н. Методологические основы определения научных тенденций и фронтов // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. – 2020. – № 10. – С. 1–12, doi: 10.36535/0548-0019-2020-10-1.

Сазонов Б.В. Методы и проблемы определения направлений перспективных научных исследований // Выявление приоритетных научных направлений: междисциплинарный подход. – М.: ИМЭМО РАН, 2016. – С. 16–28.

Тищенко В.И. Основания современных методов прогнозирования и определения приоритетов развития науки // Выявление приоритетных научных направлений: междисциплинарный подход. – М.: ИМЭМО РАН, 2016. – С. 6–15.

Филимонова Н.М., Моргунова Н.В., Синявский Д.А. Определение перспективных направлений исследования малого и среднего предпринимательства // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. – 2014. – № 9. – С. 20–26.

Åström F. Changes in the LIS research front: Time-sliced cocitation analyses of LIS journal articles, 1990-2004 // Journal of the American Society for Information Science and Technology. – 2007. – Vol. 58, No. 7. – P. 947–957, doi: 10.1002/asi.20567.

Campbell P. Escape from the impact factor // Ethics in Science and Environmental Politics. – 2008. – Vol. 8, No. 1. – P. 5–7, doi: 10.3354/esep00078.

Egghe L. The mathematical relation between the impact factor and the uncitedness factor // Scientometrics. – 2008. – Vol. 76, No. 1. – P. 117–123, doi: 10.1007/s11192-007-1902-x.

Garfield E. KeyWords Plus – ISI's Breakthrough Retrieval Method. 1. Expanding Your Searching Power on Current-Contents on Diskette // Current Contents. – 1990. – Vol. 32. – P. 5–9.

Garfield E., Sher I.H. KeyWords-Plus(™) – Algorithmic Derivative Indexing // Journal of the American Society for Information Science. – 1993. – Vol. 44, No. 5. – P. 298–299, doi: 10.1002/(sici)1097-4571(199306)44:5<298::aid-asi5>3.0.co;2-a.

Gureev V.N., Mazov N.A. Themes of the publications of an organization as a basis for forming an objective and optimal repertoire of scientific periodicals // Scientific and Technical Information Processing. – 2013. – Vol. 40, No. 4. – P. 195–204, doi: 10.3103/S0147688213040059.

Hicks D., Wouters P., Waltman L., De Rijcke S., Rafols I. Bibliometrics: The Leiden Manifesto for research metrics // Nature. – 2015. – Vol. 520, No. 7548. – P. 429–431, doi: 10.1038/520429a.

Hsu J.W., Huang D.W. A scaling between Impact Factor and uncitedness // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. – 2012. – Vol. 391, No. 5. – P. 2129–2134, doi: 10.1016/j.physa.2011.11.028.

Priem J., Groth P., Taraborelli D. The altmetrics collection // PLoS One. – 2012. – Vol. 7, No. 11. – P. 1–2, doi: 10.1371/journal.pone.0048753.

San Francisco Declaration on Research Assessment: Putting science into the assessment of research, American Society for Cell Biology. – 2013. – 10 p., URL: http://am.ascb.org/dora.

Selivanova I.V., Kosyakov D.V., Guskov A.E. The impact of errors in the Scopus database on the research assessment // Scientific and Technical Information Processing. – 2019. – Vol. 46, No. 3. – P. 204–212, doi: 10.3103/S0147688219030109.

van Raan A.F.J. The use of bibliometric analysis in research performance assessment and monitoring of interdisciplinary scientific developments // Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis. – 2003. – Vol. 1, No. 12. – P. 20–29.

Vega-Muñoz A., Arjona-Fuentes J.M., Ariza-Montes A., Han H., Law R. In search of ‘a research front’ in cruise tourism studies // International Journal of Hospitality Management. – 2020. – Vol. 85, doi: 10.1016/j.ijhm.2019.102353.

Wallace M.L., Ràfols I. Institutional shaping of research priorities: A case study on avian influenza // Research Policy. – 2018. – Vol. 47, No. 10. – P. 1975–1989, doi: 10.1016/j.respol.2018.07.005.

Zhang J., Yu Q., Zheng F.S., Long C., Lu Z.X., Duan Z.G. Comparing keywords plus of WOS and author keywords: A case study of patient adherence research // Journal of the Association for Information Science and Technology. – 2016. – Vol. 67, No 4. – P. 967–972, doi: 10.1002/asi.23437.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАЗОВ Николай Алексеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий информационно-аналитическим центром Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН. Основные научные интересы: наукометрия, информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений.

ГУРЕЕВ Вадим Николаевич – кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник информационно-аналитического центра Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН. Основные научные интересы: науковедение, библиометрия.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией многомасштабной физики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.

Геофизические технологии, № 3, 2020, с. 18–30 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619–1563–2020–3–18 УДК 537

СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ДАННЫХ АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БВС НА ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ СЕТЯХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Д.Н. Гапеев[1], М.И. Эпов[2], А.А. Тишкин[3], А.П. Фирсов[4], Я.В. Фролов[3], В.А. Останин[4], А.С. Колесов[2,4], Ю.Ю. Малетин[4]

[1]ООО ГМК «Цифра», 630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 5/9, офис 12
[2]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия
[3]Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, ул. Ленина, 61, Россия
[4]ООО «СКАН АЭРО», 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4г, оф. 215, Россия
e-mail: denis.gapeyev@gmail.com

В статье рассматривается подход к построению регулярного куба данных в приложении к задачам аэромагнитной съемки. Он основан на построении аппроксимационной сплайн-функции с узлами на нерегулярной сетке в трехмерном пространстве. Для его построения дополнительно используется информация о погрешностях измерения, что позволяет сократить число параметров по сравнению с интерполяционным сплайном. Данный подход опробован на экспериментальных данных, полученных на археологическом комплексе Ивановка-I в Алтайском крае при проведении аэромагнитного обследования.

Аэромагнитная съемка; индукция земного магнитного поля; беспилотное воздушное судно; сплайн-сглаживание; археологический комплекс

SPLINE APPROXIMATION OF UNEQUAL AEROMAGNETIC SURVEY DATA WITH THE USE OF UAV ON SPATIALLY INHOMOGENEOUS NETWORKS WHEN SOLVING PROBLEMS OF ARCHAEOLOGICAL EXPLORATION

D.N. Gapeev[1], M.I. Epov[2], A.A. Tishkin[3], A.P. Firsov[4], Ya.V. Frolov[3], V.A. Ostanin[4], A.S. Kolesov[2,4], Yu.Yu. Maletin[4]

[1]GMK Digit LLC, Inzhenernaja Str., 5/9, 12, Novosibirsk, 630090, Russia,
[2]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
[3]Altai State University, Lenin Str., 61, Barnaul, 656049, Russia,
[4]SKAN AERO LLC, Kutateladze Str., 4g, 215, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: denis.gapeyev@gmail.com

The article discusses an approach to get a regular cube of data in context of aeromagnetic survey. It is based on spline approximation with nodes on an irregular grid in three-dimensional space. To construct

© Д.Н. Гапеев, М.И. Эпов, А.А. Тишкин, А.П. Фирсов, Я.В. Фролов, В.А. Останин, А.С. Колесов, Ю.Ю. Малетин, 2020

approximation spline, information on measurement errors is additionally used, which makes it possible to reduce the number of parameters as opposed to spline interpolation. This approach was tested on experimental aeromagnetic data from archaeological site Ivanovka-I.

Aeromagnetic survey; Earth's magnetic field; unmanned aerial vehicle; spline smoothing; archaeological complex

ВВЕДЕНИЕ

В процессе аэромагнитной съемки с помощью беспилотных воздушных судов (БВС) измеряется индукция земного магнитного поля. В процессе работ БВС совершает перемещения в пространстве с измерительным оборудованием на борту. Оно регистрирует траекторию полета и значения магнитной индукции с некоторой погрешностью. Совокупность всех траекторий в трехмерном пространстве будет в дальнейшем называться кубом. Его максимальные и минимальные значения по всем пространственным координатам выбираются из соответствующих наибольших и наименьших значений координат на траекториях. В статье рассмотрены решения следующих задач:

– сжатие объема исходных данных с учетом погрешностей измерения;

– построение регулярного куба данных на основе нерегулярных пространственных сетей измерений;

– расчет пространственных производных измеренных данных в построенном кубе.

Рассмотрим решение этих задач на основе аппроксимационного сплайна, т. е. сплайна на выпуклых множествах. Такие сплайн-функции проходят в каждой точке измерения через доверительный интервал, определяемый абсолютной погрешностью измерений. Для расчета значений сплайн-функции может потребоваться не весь набор данных, а только его «информативная» часть, полностью их определяющая. Это позволяет произвести сжатие данных без потери точности аппроксимации.

Сплайн является аналитической функцией. После его построения значения, измеренные на нерегулярной пространственной сети, легко пересчитываются на любую регулярную сеть в кубе. Ее значения и значения ее пространственных производных можно вычислить любой точке куба.

СПЛАЙН ФУНКЦИИ

Общее определение интерполяционных сплайнов можно сформулировать следующим образом [Василенко, 1984]:

Пусть X, Y, Z – три пространства Гильберта со скалярным произведением $(\cdot,\cdot)_X$, $(\cdot,\cdot)_Y$, $(\cdot,\cdot)_Z$ и нормами

$$\|u\|_X = (u,u)_X^{1/2}, \|u\|_Y = (u,u)_Y^{1/2}, \|u\|_Z = (u,u)_Z^{1/2}.$$

Рассмотрим пару линейных ограниченных функционалов $A: X \to Z$ и $T: X \to Y$. Зафиксируем элемент $z \in Z$ и рассмотрим его полный прообраз $A^{-1}(z)$ при отображении A,

$$A^{-1}(z) = \{x \in X: Ax = z\}.$$

Предположим, что $A^{-1}(z)$ – непустое множество. *Интерполяционным сплайном* называется элемент $\sigma \in X$, удовлетворяющий соотношению

$$\|T\sigma\|_Y^2 = \min_{x \in A^{-1}(z)} \|Tx\|_Y^2.$$

Пусть множество $C \subset X$ выпуклое, замкнутое и непустое. *Сплайном на выпуклом множестве* будем называть $\sigma^* \in X$ такое, что

$$\|T\sigma^*\|_Y^2 = \min_{x \in C} \|Tx\|_Y^2.$$

Пусть заданы диапазоны измеренных значений $F_i^- \le F_i \le F_i^+, i = \overline{1,N}$, определяемые их абсолютной погрешностью. Определим операторы, порожденные узлами, следующим образом:

$$L_i x = x(P_i), i = \overline{1,N}, \forall x \in X.$$

Аппроксимирующим сплайном $\sigma_* \in X$ будем называть сплайн на выпуклом множестве $C = \{x \in X : F_i^- \le L_i x \le F_i^+, i = \overline{1,N}\}$.

Теорема [Лоран, 1975]. Для того, чтобы элемент $\sigma_* \in C$ был сплайном на выпуклом множестве C, необходимо и достаточно, чтобы

$$T^*T\sigma_* = \sum_{i=1}^N \lambda_i L_i,$$

где

$$\lambda_i \le 0, \text{ при } L_i\sigma_* = F_i^+,$$
$$\lambda_i \ge 0, \text{ при } L_i\sigma_* = F_i^-,$$
$$\lambda_i = 0, \text{ при } F_i^- < L_i\sigma_* < F_i^+.$$

Узлы, для которых $\lambda_i \le 0$, будем называть верхними узлами прилипания; узлы, для которых $\lambda_i \ge 0$, – нижними узлами прилипания. Если $\lambda_i = 0$ и при этом $L_i\sigma_* = F_i^+$ или $L_i\sigma_* = F_i^-$, то эти узлы будем называть узлами касания.

Подмножество функционалов из $\{L_1, \dots, L_N\}$, определяющие узлы прилипания, назовем подсеткой узлов прилипания и обозначим L_{ak}. Из теоремы следует, что:

$$T^*T\sigma_* = \sum_{L_i \in L_{ak}} \lambda_i L_i,$$

а это значит, что σ_* есть интерполяционный сплайн с соответствующими узлами.

Введем понятие фундаментального (для множества L_{ak}) сплайна φ_i, отвечающего функционалу $L_i \in L_{ak}$ следующим образом:

$$L_i\varphi_i = 1, L_j\varphi_i = 0, \forall j \ne i : L_j \in L_{ak}.$$

Тогда для любого $\vec{G} = \{G_1, \dots, G_N\} \in \mathbb{R}^N$имеет место равенство $\sigma_{\vec{G}} = \sum_{i=1}^{N} G_i \varphi_i$, где $\sigma_{\vec{G}}$ – интерполяционный сплайн по набору входных данных $\vec{G}$.

Введем выпуклую неотрицательную квадратичную форму, характеризующую «энергию» сплайна:

$$\Phi(\vec{G}) = \left\| T\sigma_{\vec{G}} \right\|_Y^2 = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} G_i G_j (T\varphi_i, T\varphi_j) = (\boldsymbol{B}\vec{G}, \vec{G}),$$

где $\boldsymbol{B}$ – матрица, составленная из элементов $b_{ij} = (T\varphi_i, T\varphi_j)$. Следовательно, задача поиска сплайна на выпуклом множестве эквивалентна задаче квадратичного программирования [Ковалков, 1983]

$$\min_{x \in C} \|Tx\|_Y^2 = \min_{\vec{G} \in \tilde{C}} (\boldsymbol{B}\vec{G}, \vec{G}) = (\boldsymbol{B}\vec{F}^0, \vec{F}^0),$$

где $\tilde{C} = [F_1^-, F_1^+] \times [F_2^-, F_2^+] \dots [F_N^-, F_N^+]$, а $\vec{F}^0$ – ее решение. При этом $\vec{F}^0$ связано с решением задачи соотношениями $L_i \sigma_* = \sigma_*(P_i) = F_i^0$. Вектор $\vec{F}^0$ очевидным образом определяет узлы прилипания сплайна σ_*.

Далее будем рассматривать полигармонические интерполяционные и аппроксимационные сплайны, для построения которых необходимо определить следующее:

1) пространство Соболева $W_2^2(\mathbb{R}^3)$ в качестве пространства X;
2) оператор Лапласа Δ в качестве оператора T;
3) пространство Лебега $L(\mathbb{R}^3)$ в качестве пространства Y;
4) $Z = \mathbb{R}^N - N$-мерное пространство вещественных чисел, где N – число узлов сплайна;
5) интерполяционный функционал $A: W_2^2(\mathbb{R}^3) \to \mathbb{R}^N$ однозначно определяется набором узлов по формуле: $A(f) = \{f(P_1), \dots, f(P_N)\}$, где $f \in W_2^2(\mathbb{R}^3)$, $P_1, \dots, P_N \in \mathbb{R}^3$ – узлы интерполяции.

Рассмотрим применение сплайн-аппроксимации реальных данных пространственной аэромагнитной съемки.

АЭРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА НА АРХЕОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИВАНОВКА-I

Аэромагнитная съемка проводилась на археологическом комплексе «Ивановка-I, курганная группа» в Шелаболихинском районе Алтайского края для локализации конкретных объектов (курганов [Эпов, 2016]) и уточнения их пространственной структуры. Для проведения работ было выделено два участка. На участке «Южный» расположены два крупных объекта (№ 1 и № 2), достоверно являющиеся древними погребальными сооружениями. На участке «Северный» сосредоточено большинство объектов, насыпи которых разрушены в ходе распашки и слабо выделяются на земной поверхности. Сначала тестировались курганы участка «Южный». На рисунке 1 представлен план памятника, составленный на основе визуальных полуинструментальных фиксаций и уточненный с использованием спутниковых снимков. Далее в статье рассматривается «Южный» участок.

Объекты участка «Южный» представлены двумя искусственными сооружениями из грунта. Курган № 1 имеет насыпь диаметром 43 м и высотой 3 м, а курган № 2 – диаметр 35 м и высоту 1.2 м. В центре каждого кургана прослеживаются грабительские ямы глубиной до 3 м. Оба кургана сильно повреждены в результате антропогенного и техногенного воздействия: сооружение триангуляционного пункта на кургане № 1, систематическая распашка краев насыпи и околокурганного пространства. Это сильно изменило первоначальные размеры и конфигурацию земляных надмогильных сооружений.

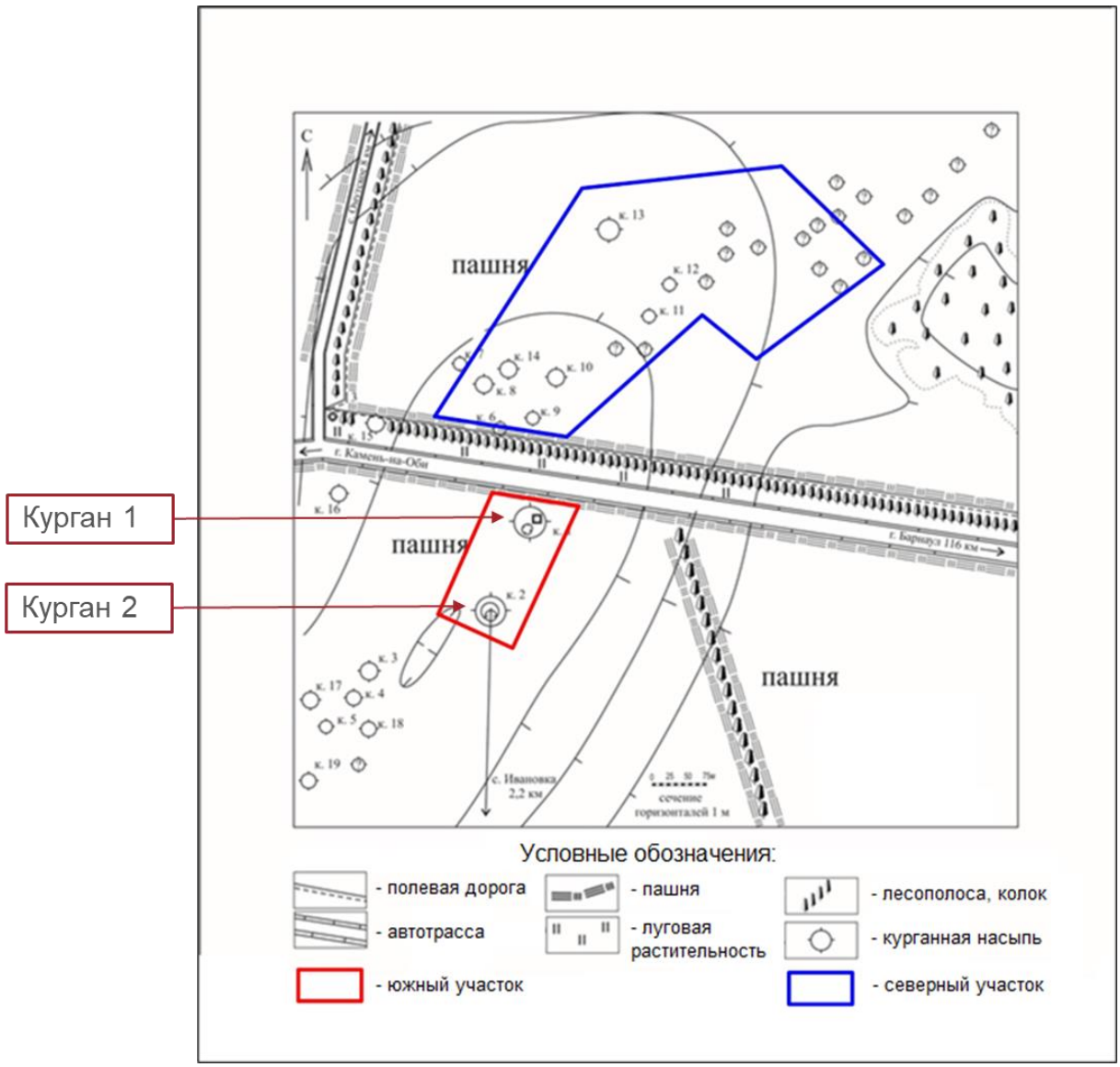

Рис. 1. Схема расположения объектов и участков работ

Аналогичные курганы имеют насыпи, сложенные из камня [Тишкин и др., 2017], а также часто окружены рвами [Тишкин и др., 2007; Фролов, Тишкин, 2020]. При полевом обследовании подножий курганов обнаружено увеличение магнитной восприимчивости почв по сравнению с фоновыми значениями с $0.6*10^3$ ед. СИ, до $1.4*10^3$ ед. СИ.

На каждом из двух участков выполнена трехуровневая аэромагнитная съемка модуля вектора индукции земного магнитного поля. Траектории полетов на участке «Южный» и их местоположение в трехмерном пространстве (с коэффициентом 10 для высот полета) показаны на рис. 2 и 3, соответственно. Каждая траектория характеризуется двумя наборами профилей и участками перехода с одного профиля на другой. Каждый из наборов профилей характеризуется прямым или обратным направлениями полетов. Среднее расстояние между профилями на одном высотном уровне составляет в среднем 2.5 м. Расстояние между точками измерений на профиле составляет в среднем 0.02 м. Полеты выполнялись на трех высотах над земной поверхностью: 5, 7 и 9 м. Таким образом, сеть наблюдений была очень неравномерной: густой на профилях и редкой между профилями. Куб для представления данных: $-5 \le x \le 197$, $0 \le y \le 212$, $0 \le z \le 13$.

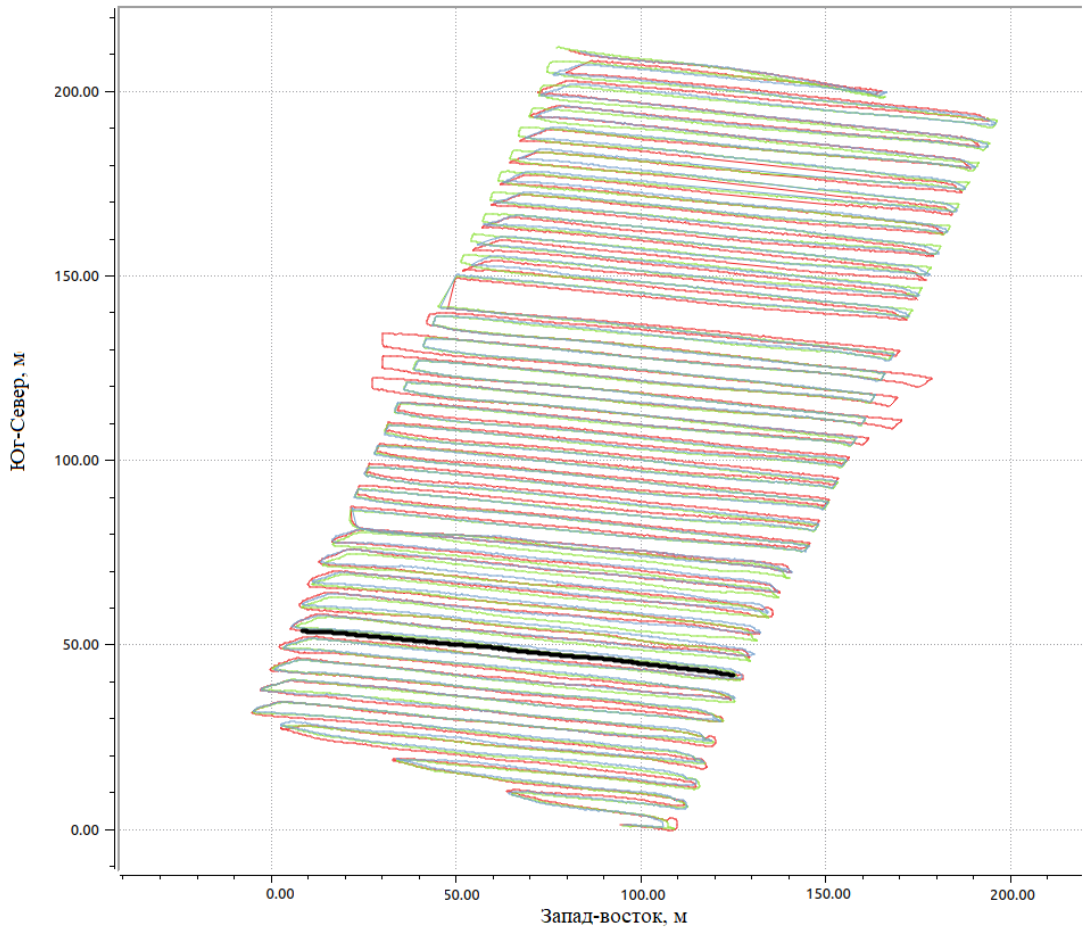

Рис. 2. Схема траекторий полетов на участке «Южный». Красным цветом отмечена траектория на высоте 5 м, зеленым – 7 м, синим – 9 м, черным отмечен выделенный профиль, проходящий через курган 2

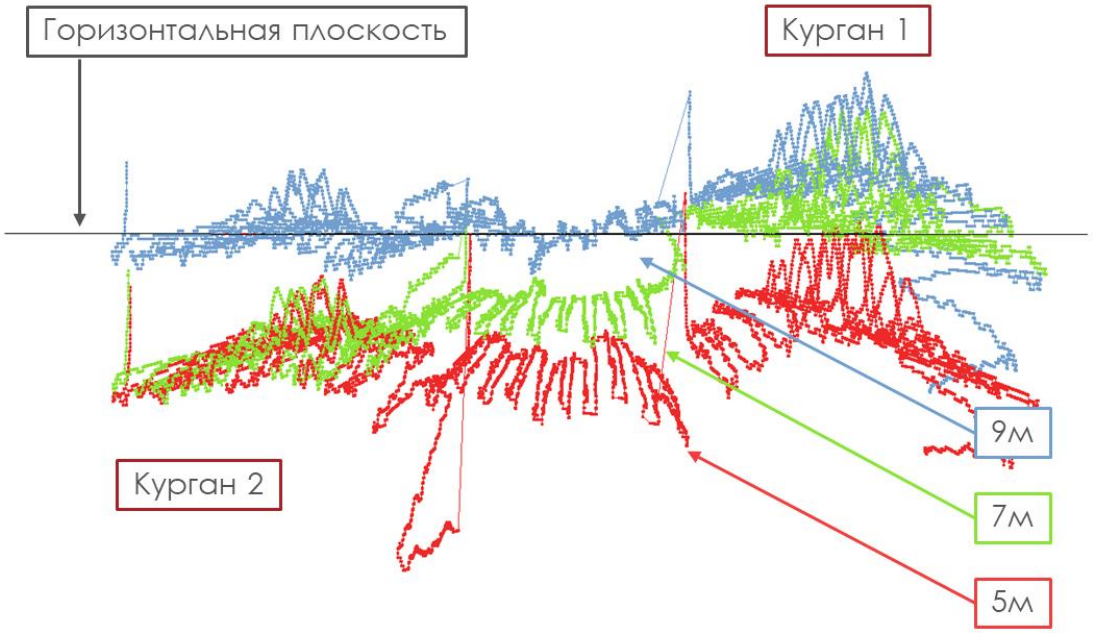

Рис. 3. Траектории полетов на участке «Южный» в пространстве. Красным цветом отмечена траектория на высоте 5 м, зеленым – 7 м, синим – 9 м, горизонтальная плоскость построена на высоте 9 м

В каждой точке измерений регистрировалось значение сигнала и абсолютная погрешность его измерения. Аномальное значение модуля индукции земного магнитного поля было определено как разность измеренного значения и среднего арифметического значения, рассчитанного по всем измеренным значениям. На рисунке 4 показано распределение аномального сигнала по профилям. Подавляющая часть значений укладывается в диапазон от –15 нТл до 30 нТл.

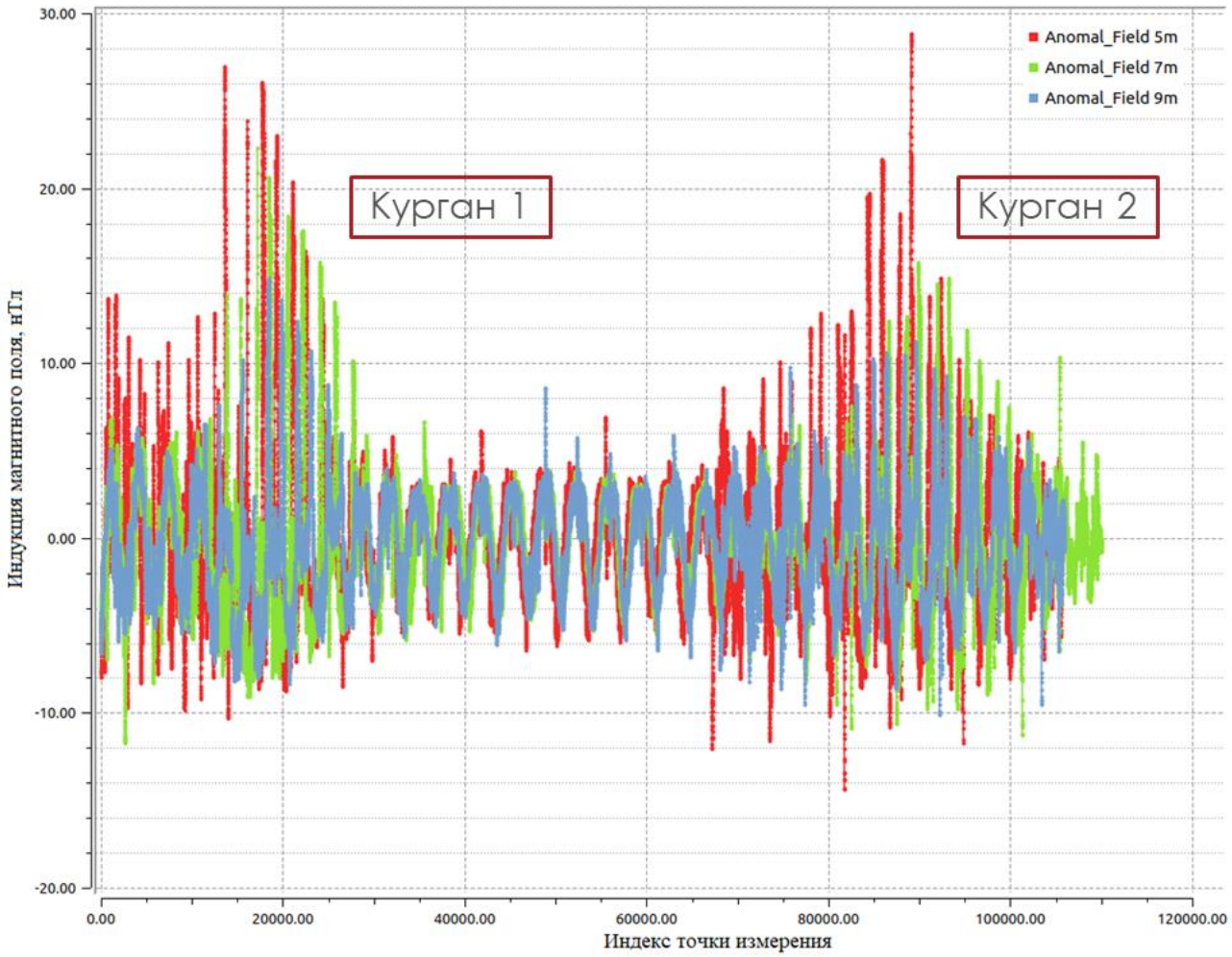

Рис. 4. Аномальные значения модуля индукции земного магнитного поля

На рисунке 5 показаны значения индукции магнитного поля и доверительный интервал ±1 нТл на разных высотах вдоль профиля, выделенного на рис. 2.

Была проведена серия вычислений аппроксимирующего сплайна для доверительных интервалов ±1, ±2, ±3, ±4 и ±5 нТл, результаты представлены в табл. 1. При построении трехмерных сплайн-функций использовалось 327188 точек измерения.

Для построения аппроксимирующего сплайна, удовлетворяющего погрешности ±5 нТл, понадобилось всего 522 узла, т. е. 0.16 %. Такое малое число информативных узлов объясняется относительно широким доверительным интервалом, составляющим 10/40 или 25 % всего интервала изменений аномальной части индукции аномального магнитного поля. Для построения аппроксимирующего сплайна, удовлетворяющего погрешности ±1 нТл, уже понадобилось 14504 узла, т. е. 4.43 %.

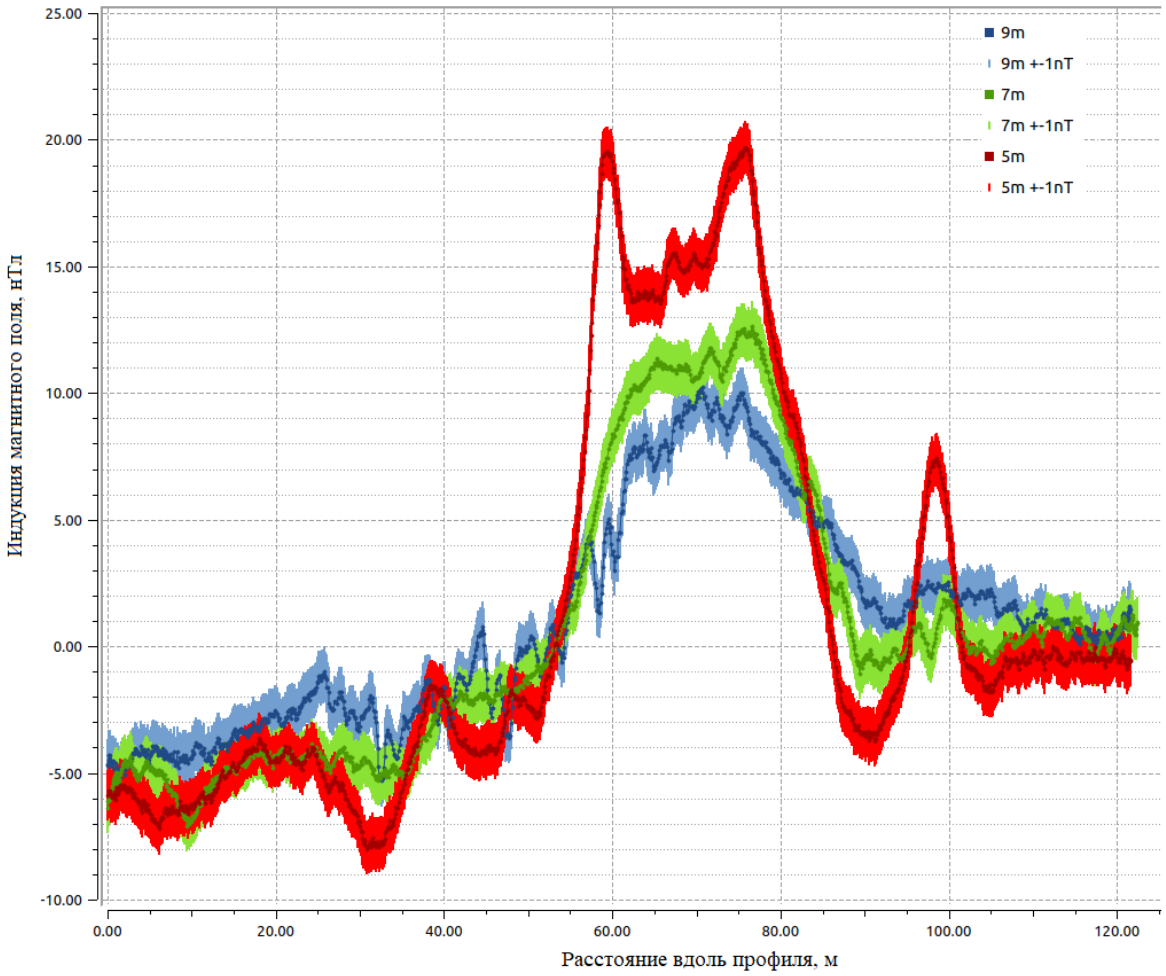

Рис. 5. Значения индукции магнитного поля на высотах 5, 7 и 9 м вдоль профиля, выделенного на рис. 2: темно-красный, темно-зеленый и темно-синий цвет соответствует измеренным значениям, ярко-красный, ярко-зеленый и голубой – доверительному интервалу ±1 нТл

Таблица 1.

Степень сжатия информации

Значения доверительного интервала, нТл	Количество узлов аппроксимирующего сплайна, шт.	Степень сжатия информации, %
±5	522	0.16
±4	1020	0.31
±3	2204	0.67
±2.5	3270	1.00
±2	4981	1.52
±1.75	6243	1.91
±1.5	7977	2.44
±1.25	10616	3.24
±1	14504	4.43

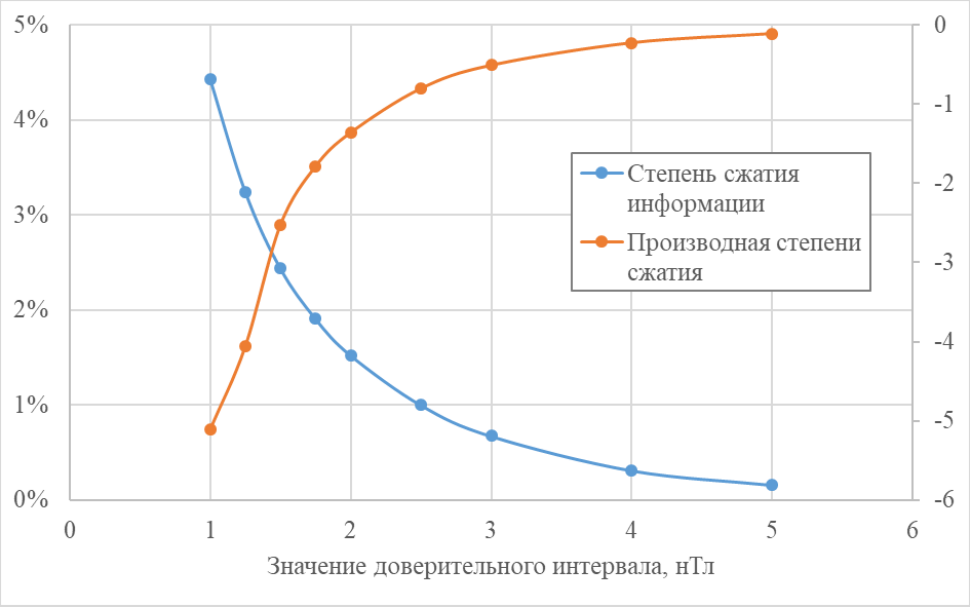

Рис. 6. Степень сжатия информации (ось ординат слева) и ее производная (ось ординат справа).

На рисунках 7 и 8 представлены карты значений сплайн-функции на высотах 5 и 7 м, построенные на пересчитанной прямоугольной регулярной сетке с шагами дискретизации 0.67 м и 0.71 м (300 точек на диапазон) по осям X и Y соответственно. При этом, доверительный интервал абсолютных погрешностей был принят равным ±1 нТл. Отчетливо видны, выделенные синим цветом положительные аномалии, соответствующие курганам. В центрах аномалий наблюдается уменьшение положительных значений, обусловленные ямами в курганах. Менее отчетливо видны кольцевые аномалии вокруг курганов № 1 и 2, соответствующие рвам. При детальном сравнении карт видно, что на более низкой высоте есть структуры, исчезающие на более высоком уровне. Так касательно к кургану № 2 расположена тонкая линейно вытянутая отрицательная аномалия, наблюдаемая только на высоте 5 м. На рисунках 9 и 10 приведены карты нормированной амплитуды пространственного градиента на высотах 5 и 9 м соответственно. На них хорошо выделяются тонкие детали строения участка «Южный», в частности линейные аномалии субширотного направления, связанные с участками пашни.

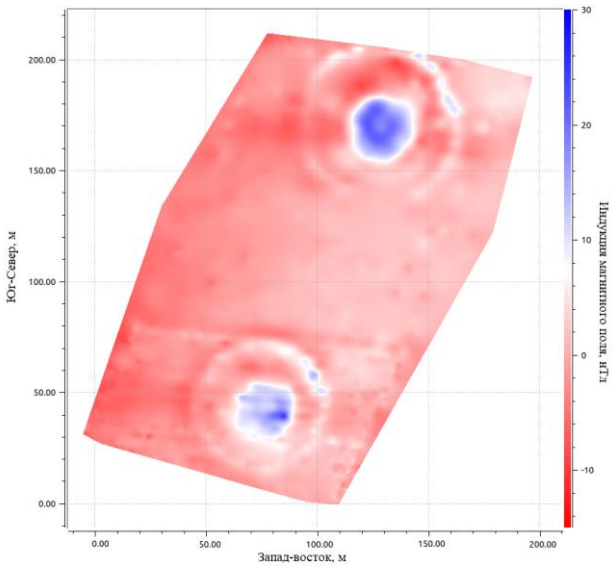

Рис. 7. Карта значений сплайн-функции на высоте 5 м

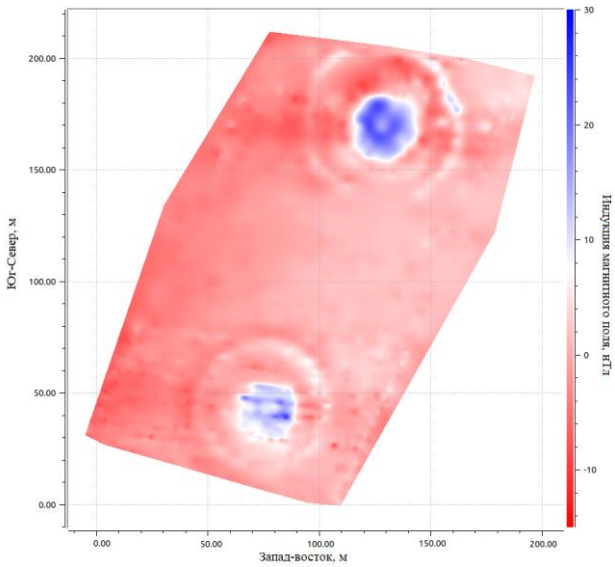

Рис. 8. Карта значений сплайн-функции на высоте 7 м

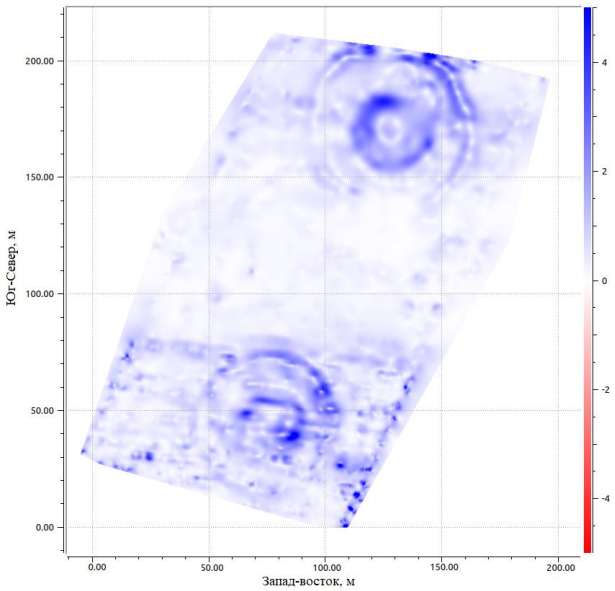

Рис. 9. Карта нормированной амплитуды пространственного градиента сплайн функции на высоте 5 м

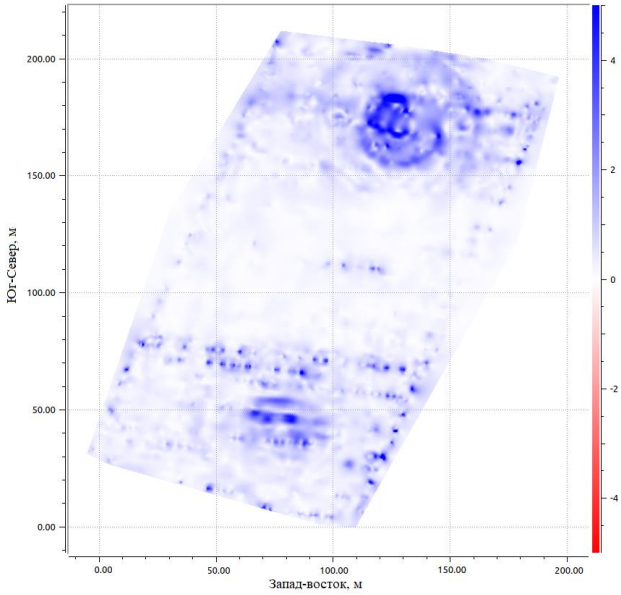

Рис. 10. Карта нормированной амплитуды пространственного градиента сплайн функции на высоте 9 м

На рисунках 11 и 12 показаны карты вертикальной производной от сплайн-функции на высотах 5 и 7 м соответственно. На них, кроме основных структур, отражаются и другие детали строения, еще нуждающиеся в археологической расшифровке.

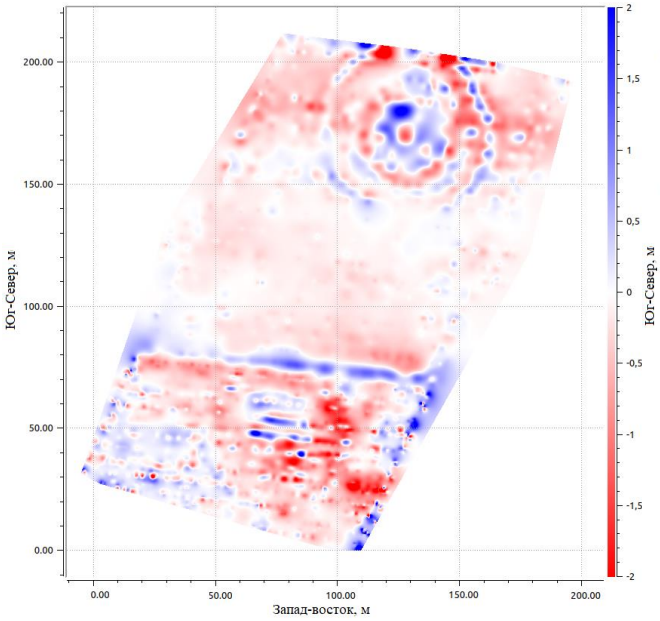

Рис. 11. Карта значений вертикальной производной сплайн-функции на высоте 5 м

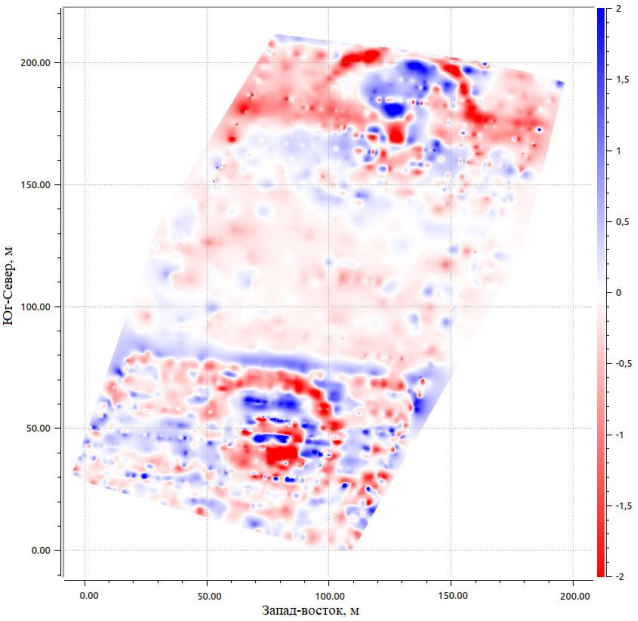

Рис. 12. Карта значений вертикальной производной сплайн-функции на высоте 7 м

На рисунках 13–16 приведены карты меридиональной и широтных производных, на высотах 5 и 7 м соответственно. Общая структура неоднородностей хорошо коррелирует с картами пространственных производных. На них отчетливо видно, что глубина грабительской ямы на кургане № 1 превосходит таковую на кургане № 2. На рисунке 17 показана карта лапласиана аномальных значений индукции магнитного поля на высоте 7 м, показывающая возможность расчета вторых пространственных производных.

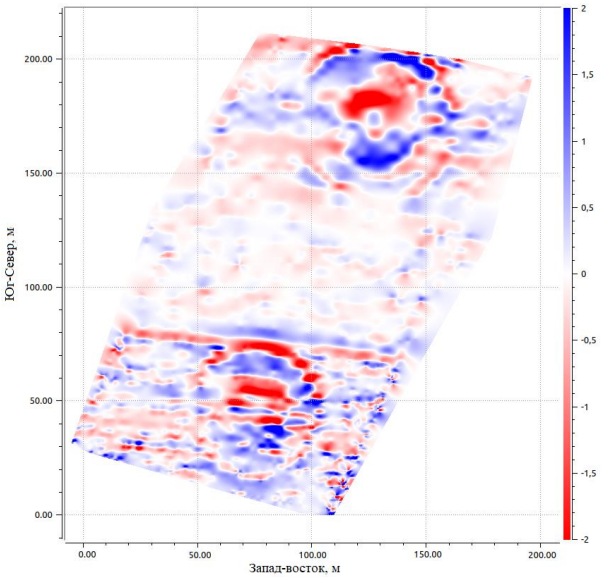

Рис. 13. Карта значений меридиональной производной сплайн-функции на высоте 5 м

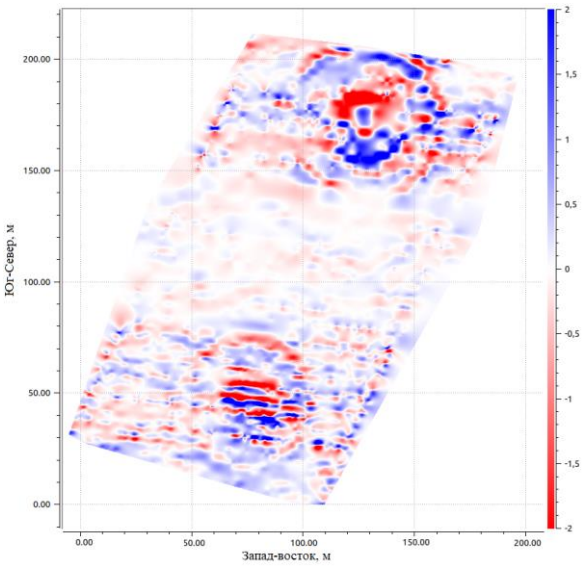

Рис. 14. Карта значений меридиональной производной сплайн-функции на высоте 7 м

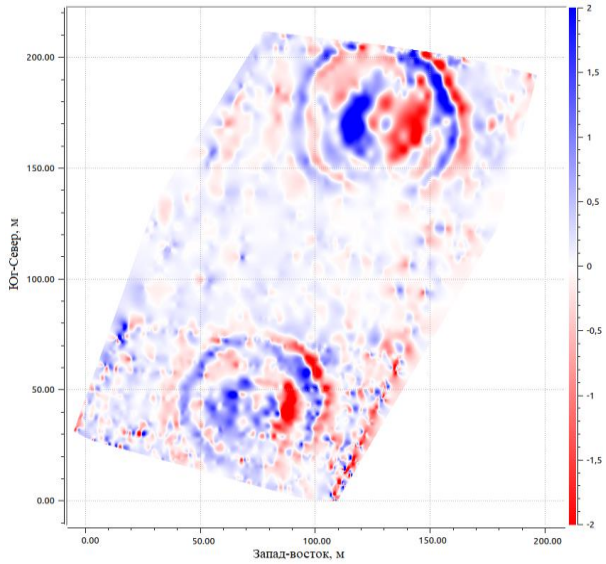

Рис. 15. Карта значений широтной производной сплайн-функции на высоте 5 м

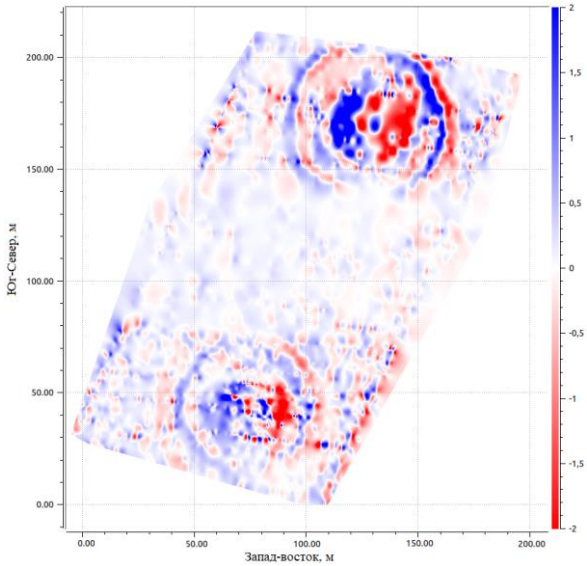

Рис. 16. Карта значений широтной производной сплайн-функции на высоте 7 м

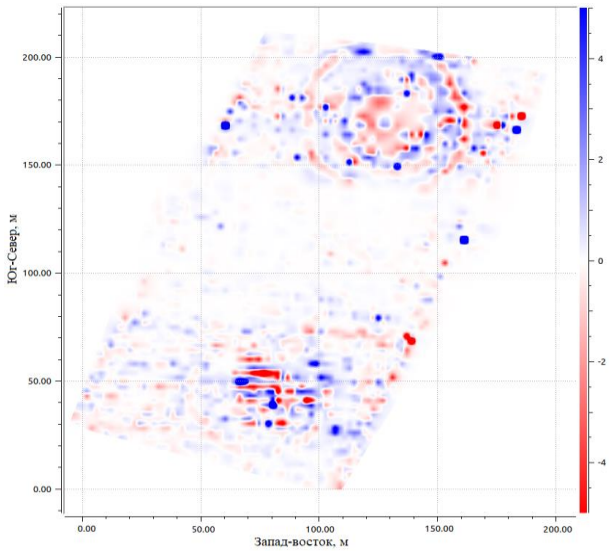

Рис. 17. Карта значений лапласиана сплайн-функции на высоте 7 м

Целью данной статьи была демонстрация работы предложенного алгоритма сплайн-аппроксимации на практических данных. Для этого были выбраны кондиционные данные аэромагнитной съемки на трех уровнях. Археологические результаты предполагается опубликовать в другой статье в специализированном журнале по археологии.

ВЫВОДЫ

Применение сплайнов позволило построить регулярный куб аномальных значений индукции магнитного поля, ее пространственных производных, а также модуля градиента и вертикальной производной от магнитной индукции.

На полевых данных показано, что расширение доверительного интервала (увеличение абсолютной погрешности измерений) приводит к сокращению объема данных, необходимых для представления полевых измерений с заданной точностью. Это связано с тем, что не все измеренные значения необходимы для построения аппроксимирующего сплайна. Изменение степени сжатия информации позволяет сделать достоверную оценку среднего уровня абсолютной погрешности по всему участку.

На картах аномальных значений индукции магнитного поля и ее пространственных производных отчетливо проявляются черты археологических объектов, требующие детальной идентификации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-49-220006 «Крупные курганы элиты древних и средневековых кочевников на территории Алтайского края как объекты экскурсионно-туристической деятельности: историко-археологические и естественно-научные исследования»).

ЛИТЕРАТУРА

Василенко В.А., Зюзин М.В., Ковалков А.В. Сплайн-функции и цифровые фильтры. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – 156 с.

Ковалков А.В. Об одном алгоритме построения сплайнов с дискретными ограничениями типа неравенств. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. – Препринт № 385. – 15 с.

Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация. – М.: Мир, 1975. – 495 с.

Тишкин А.А., Чугунов К.В., Чемякина М.А., Дядьков П.Г., Манштейн А.К., Позднякова О.А., Миненко М.И., Адайкин А.А. Геофизические исследования на памятнике Бугры в предгорьях Алтая // Алтае-Саянская горная страна и история освоения ее кочевниками. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2007. – С. 215–220.

Тишкин А.А., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Колесов А.С., Шеремет А.С. Магнитометрическая съемка «царского» кургана и ближайшей территории на археологическом памятнике Урочище Балчикова-3 с помощью беспилотного летательного аппарата // Теория и практика археологических исследований. – 2017. – № 4 (20). – С. 103–111.

Фролов Я.В., Тишкин А.А. Крупные курганы в Мамонтовском районе Алтайского края // Сохранение и изучение культурного наследия Алтайского. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2020. – Вып. XXVI. – С. 216–224.

Эпов М.И., Молодин В.И., Манштейн А.К., Балков Е.В., Дядьков П.Г., Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Бортникова С.Б., Позднякова О.А., Карин Ю.Г., Кулешов Д.А. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 603–614.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГАПЕЕВ Денис Николаевич – технический директор ООО ГМК «Цифра». Основные научные интересы: математические методы в геофизики, разработка программного обеспечения в том числе с использованием технологий параллельных/распределенных вычислений.

ЭПОВ Михаил Иванович – доктор технических наук, академик, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, включая их интерпретацию; геофизические методы поиска и разведки месторождений, включая морскую геоэлектрику и скважинную геофизику, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии; а также эффекты взаимодействия электромагнитных импульсов с флюидонасыщенными горными породами.

ТИШКИН Алексей Алексеевич – доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой археологии, этнографии и музеологии Алтайского государственного университета. Основные научные интересы: разработка и наполнение конкретным содержанием культурно-хронологической концепции изучения истории древних и средневековых народов Алтая и сопредельных территорий, использование естественно-научных методов в археологических исследованиях, архаичные кочевые империи, социальные реконструкции, система жизнеобеспечения, методологические принципы интерпретации крупных курганов.

ФИРСОВ Андрей Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, руководитель проекта «Аэротомография», ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: теория и моделирование систем расплав – двухкомпонентный флюид, флюидные и расплавные включения в минералах, геофизических методов исследования с помощью БВС.

ФРОЛОВ Ярослав Владимирович – кандидат исторических наук, директор Музея археологии и этнографии Алтая Алтайского государственного университета. Основные научные интересы: документирование археологических объектов, культура населения Обь-Иртышского междуречья в раннем железном веке, создание базы данных о крупных курганах, музейное дело.

КОЛЕСОВ Александр Сергеевич – ведущий специалист, ООО «СКАН АЭРО»; инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: конструирование БВС и аэрокомплексов на основе легких БВС.

ОСТАНИН Владимир Александрович – ведущий специалист ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: корректирование гидродинамических моделей на основании данных площадной геофизической съемки (сейсморазведка, магниторазведка), реализация прикладного программного обеспечения.

МАЛЕТИН Юрий Юрьевич – ведущий специалист ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: первичная обработка геофизических данных, полученных с помощью БВС.

Геофизические технологии, № 3, 2020, с. 31–37 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619–1563–2020–3–31 УДК 550.34

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ В ЗОНАХ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ ПО ДАННЫМ О МЕХАНИЗМАХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

О.А. Кучай

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Определено направление горизонтального смещения для активных геологических разломов Центральной Азии по данным о механизмах очагов землетрясений, возникших вблизи этих разломов. Полученные результаты сопоставлялись с геологическими материалами. В восьми случаях из десяти анализ расчета направления смещения, полученного по сейсмологическим материалам, согласуется с кинематикой разломов.

Механизм очага землетрясения; разлом; сдвиг; Центральная Азия

THE HORIZONTAL DISPLACEMENTS IN ACTIVE FAULT ZONES IN CENTRAL ASIA BASED ON DATA ON THE MECHANISMS OF EARTHQUAKE FOCI

O.A. Kuchay

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

The directions of horizontal displacement along active geological faults in Central Asia are determined based on data on the mechanisms of earthquake foci that occurred near these faults. The results were compared with geologic materials. In eight cases out of ten, the analysis of calculating the direction of displacement obtained from seismological materials is consistent with the kinematics of faults.

Earthquake focal mechanism; fault; shift; Central Asia

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе используется методика определения типа горизонтального смещения в зоне разлома, опубликованная в журнале «Геофизические технологии» [Кучай, Дядьков, 2018]. В настоящей статье подобран материал по механизмам очагов землетрясений, произошедших в зонах динамического влияния [Борняков, Шерман, 2000] наиболее активных разломов Центральной Азии. Этот материал позволил определить характер горизонтальных тектонических смещений в зонах разломов по данным механизмов очагов землетрясений и сопоставить полученные данные с геологическими материалами.

© О.А. Кучай, 2020

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В предыдущей статье [Кучай, Дядьков, 2018] мы опирались на каталоги параметров механизмов очагов землетрясений, полученных нами и геофизиками Иркутска. Сейчас, используя материалы международного каталога [*http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/interactive/*], удалось выбрать данные, при которых землетрясения расположены как по самому разлому, так и в крыльях крупных разломов Центральной Азии.

Кратко остановимся на методике. Сдвиговая компонента ε_{xy} нормированного тензора сейсмотектонических деформаций находится по формуле [Ризниченко, 1985]:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{\mu V t}\sum_{n=1}^{N} M_0^{(n)} \left(sin^2\varphi_{T_n} \sin\alpha_{T_n} \cos\alpha_{T_n} - sin^2\varphi_{P_n} \sin\alpha_{P_n} \cos\alpha_{P_n} \right),$$

где φ_T и φ_P – углы между вертикалью и осями растяжения (Т) и сжатия (Р), определенные в очагах каждого землетрясения, α_T и α_P – азимуты осей растяжения и сжатия, т. е. углы между горизонтальной проекцией осей растяжения (Т) или сжатия (Р) и меридианом; μ – модуль сдвига; V – элементарный объем; t – период исследования; M_0 – сейсмический момент землетрясения с номером $n = 1, 2, \ldots N$.

Для расчета преимущественного сдвигового смещения в зоне разлома вводится прямоугольная система координат, где одна ось координат направлена горизонтально и параллельно линии простирания участка разлома, а другая располагается по нормали к этому разлому в горизонтальной плоскости. Имея данные по ориентации осей сжатия и растяжения в очагах землетрясений и азимут простирания разлома, можно рассчитать среднюю деформацию, соответствующую левому $\varepsilon_{xy(\text{л})}$ или правому $\varepsilon_{xy(\text{пр})}$ сдвигу в зоне разлома [Кучай, 1990; Кучай, Дядьков, 2018]:

$$\varepsilon_{xy(\text{л})} = \frac{1}{\mu V t}\sum_{n=1}^{N} M_0^{(n)} \left(sin^2\varphi_{T_n} \sin\beta_{T_n} \cos\beta_{T_n} - sin^2\varphi_{P_n} \sin\beta_{P_n} \cos\beta_{P_n} \right),$$

$$\varepsilon_{xy(\text{пр})} = \frac{1}{\mu V t}\sum_{n=1}^{N} M_0^{(n)} \left(sin^2\varphi_{T_n} \sin\beta_{T_n} \cos\beta_{T_n} - sin^2\varphi_{P_n} \sin\beta_{P_n} \cos\beta_{P_n} \right),$$

где β_P и β_T – углы между направлением единичного горизонтального вектора в плоскости разлома и горизонтальной проекцией осей сжатия (Р) и растяжения (Т), отсчитываемые по часовой стрелке от этого единичного вектора.

Условно принимаем, что сейсмотектонические деформации, благоприятствующие левому сдвигу $\varepsilon_{xy(\text{л})} < 0$, правому $\varepsilon_{xy(\text{пр})} > 0$. Отношения $\xi = \varepsilon_{xy(\text{л})} / \varepsilon_{xy(\text{пр})}$ показывает во сколько раз в плоскости разлома левый сдвиг предпочтительнее правого или правый сдвиг предпочтительнее левого $\eta = \varepsilon_{xy(\text{пр})} / \varepsilon_{xy(\text{л})}$ Величины $\varepsilon_{xy(\text{л})}$ и $\varepsilon_{xy(\text{пр})}$ характеризуют средние левосдвиговые и правосдвиговые деформации в зоне разлома.

Для нахождения деформаций $\varepsilon_{xy(\text{л})}$ и $\varepsilon_{xy(\text{пр})}$ расчет производится как с учетом значений сейсмического момента каждого землетрясения, так и без учета этих величин. В том случае, если значение ξ в одном варианте больше η, а в другом (с использованием M_0) – значение η больше ξ, то такой вариант считается ненадежным.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На территории Центральной Азии встречается значительное количество активных разломов сдвигового типа, в частности Таласо-Ферганский, Памиро-Каракорумский. В то же время, много разломов надвигового типа с небольшой сдвиговой составляющей, для которых возможно определить эту сдвиговую составляющую. Коэффициенты предпочтительности направления горизонтального смещения (ξ и η) в зонах разломов были рассчитаны для главных разрывных нарушений, расположенных на территории Центральной Азии с координатами φ = 26º – 43ºс.ш., λ = 63º – 103ºв.д. Схема расположения разломов взята из монографии [Трифонов и др., 2002] и статьи [Бачманов и др., 2017]. При расчете горизонтального типа смещения по механизмам очагов направление простирания разлома менялось в пределах 5–10º. Если изменение простирания линии разлома оказывалось большим, то выделялись участки с близким направлением простирания.

Для расчета использовались механизмы очагов землетрясений, произошедшие в зоне разлома на расстоянии до 0.5º от сместителя разлома. Такое значительное расстояние от разлома связано с размерами очагов используемых землетрясений (M_W 4.6–7.9) и точностью определения координат. Для расчета использовались параметры механизмов очагов из каталогов [*http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/interactive/*] за период с 1977 по май 2020 г. с M_W > 4.6. Для некоторых разломов количество использованных данных по механизмам очагов землетрясений недостаточно для надежного расчета. Поэтому для ряда разломов приведены предварительные результаты.

На основе расчетов были получены следующие значения параметров ξ и η.

Таласо-Ферганский разлом (азимут разлома 125º) (рис. 1). Таласо-Ферганский разлом является крупнейшей сдвиговой дизъюнктивной структурой Средней Азии, формирующей границу между Западным и Центральным Тянь-Шанем. Это правосторонний сдвиг, заложившийся в поздне-палеозойское время [Корженков и др., 2013], протяженность разлома около 800 км, правосдвиговая компонента смещений в 10–30 раз превосходит взбросовую [Буртман и др., 1987]. Зона разлома сейсмична, очаги землетрясений достигают глубины 50 км [Трифонов и др., 2002]. На основе расчетов было получено ξ=0.062, η=16.0, ξ_M =0, η_M =62.81 и эти результаты свидетельствуют о правом сдвиге.

Разлом Кепинг (азимут простирания 85º) (рис. 1) расположен северо-западнее Тарима. Разлом преимущественно надвигового типа [Трифонов и др., 2002]. Но Кипчакский разлом, расположенный севернее разрывного нарушения Кепинг и параллельно ему, характеризуется левым сдвигом [Баженов, Миколайчук, 2004]. Поэтому, возможно, разлом Кепинг также имеет сдвиговую составляющую. ξ и η

рассчитаны только для северо-западной части: ξ =2.715, η =0.368, ξ_M =1.2, η_M =0.773; По полученным данным имеется небольшая левосдвиговая составляющая.

Алтынтагский разлом (рис. 1) (Алтынэмельский, рис. 2 в монографии [Трифонов и др., 2002] оконтуривает Тарим с юга. Вдоль северного фланга Тибета и Цайдама протягиваются левые сдвиги. Крупнейшим из них является Алтынтагский разлом протяженностью свыше 2000 км. В его центральной части скорость сдвига с начала неоплейстоцена – около 6 мм/год. На востоке разлома скорость с начала неоплейстоцена составляет 7 мм/год, но геодезические наблюдения за 1910–1975 гг. выявили крип со скоростью лишь 2 мм/год [Трифонов и др., 2002]. Для расчета разлом был разбит на два фрагмента. Западный фрагмент разлома имеет простирание 90°, восточный, достаточно протяженный, с азимутом 70°. Расчет для западного фрагмента разлома: ξ =8.02, η=0.124, ξ_M =147, η_M =0.006, для восточного ξ =999, η =0, ξ_M =999, η_M =0. Таким образом, для всего разлома характерен левый сдвиг.

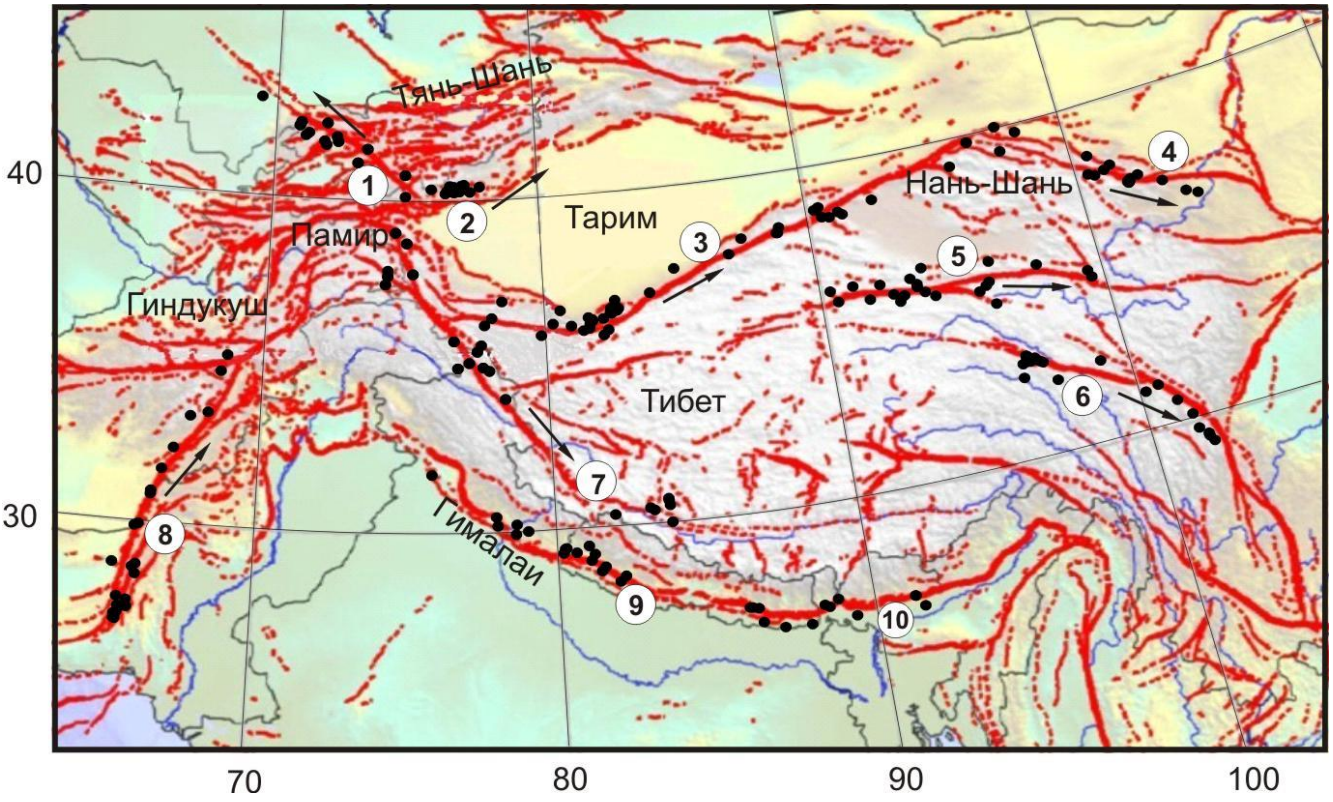

Рис. 1. Карта разломов [Бачманов и др., 2017] и эпицентры землетрясений, параметры механизмов очагов которых были использованы при расчете горизонтального типа смещения по разломам. Разломы: 1 – Таласо-Ферганский, 2 – Кепинг, 3 – Алтынтагский, 4 – Чангма-Килианский, 5 – Арнимакинг (Ксидатан-Маку), 6 – Ксианшухе, 7 – Памиро-Каракорумский, 8 – Чаманский, 9 – Фронтальный Гималаев, 10 – Главный пограничный Гималаев. Тонкими стрелками показано направление горизонтального смещения по разлому

Разлом Чангма-Килианский (азимут разлома 115°) (рис. 1). В восточной части Алтынтагской зоны на юго-восток ответвляется Чангма-Килианский разлом. В его северо-западной части скорость голоценового сдвига не менее 3,6 мм/год, тогда как скорость коррелируемого с ним взброса юго-западного крыла составляет лишь 0.15–0.25 мм/год. Таким образом, отношение сдвиговой и вертикальной компонент

4.7/1 [Трифонов и др., 2002]. При расчете получено ξ=15.15, η=0.066, ξ_M=29, η_M=0.0336, что соответствует левому сдвигу.

Разлом Арнимакинг (азимут простирания 95°). Между Цайдамом и Тибетом на 1100 км протягивается левый сдвиг Ксидатан-Маку (Арнимакинг). В его центральной части определения средней скорости движений колеблются в интервале 1–10 мм/год [Трифонов и др., 2002]. На основе расчетов получено ξ=47.74, η=0.02, ξ_M=239, η_M=0.00004. Результаты свидетельствуют о левом сдвиге.

Разлом Ксианшухе (азимут разлома 115°). Зона разлома Ксианшухе, протягивается на юго-восток на 800 км. Скорость современного левого сдвига, подсчитанная суммированием сейсмических моментов землетрясений, составляет 5–6 мм/год, а измеренная геодезически – 6–7.9 мм/год. На юго-восточном окончании зона Ксианшухе отклоняется к югу и переходит в меридиональный левый сдвиг Аннинг [Трифонов и др., 2002]. При расчетах получено ξ=884.8, η=0.0011, ξ_M=525, η_M=0.0022. Выполненные вычисления характеризуют левый сдвиг.

Памиро-Каракарумский разлом. Для расчета разлом был разбит на два фрагмента. Северная часть разлома имеет простирание 145°, южная – 115°. Памиро-Каракорумский правый сдвиг развивался на фланге Памиро-Пенджабского синтаксиса. На всем его протяжении выявлены позднечетвертичные смещения. В северо-западной части разлома скорость голоценового сдвига определена в 15–20 мм/год при скорости позднеплейстоцен-голоценовой вертикальной составляющей движения не менее 3 мм/год, тогда как в юго-западной части разлома скорость послеледникового сдвига достигает 27–35 мм/год. Уменьшение скорости сдвига к северу частично компенсируется подвижками по оперяющим его разломам Памира [Трифонов и др., 2002]. Расчет для северного фрагмента разлома (азимут фрагмента разлома 145°) свидетельствует, что ξ=0.014, η=68.81, ξ_M=0, η_M=30.98; для южного (азимут фрагмента разлома 115°) – ξ=0.09, η=11.064, ξ_M=0, η_M=24.97. Таким образом, по сейсмологическим данным получен правый сдвиг.

Чаманский разлом (азимут разлома 25°). Современная граница Аравийско-Иранского и Памиро-Гималайского сегментов образована системой левых сдвигов, из которых крупнейшими являются Чаманский разлом и Дарвазский сегмент Дарваз Алайской зоны. По зоне разломов, кулисно подставляющей Чаманский сдвиг на юго-востоке (ее сегменты известны под разными названиями: разломы Газабад, Инаятуппа-Карех и др.), скорость позднечетвертичного сдвига, вероятно, близка к 8 мм/год при уступающей ей в десятки раз вертикальной компоненте движений [Трифонов и др., 2002]. Рассчитанный характер смещения по разлому соответствует левому сдвигу, где ξ=33.05, η=0.03, ξ_M=174, η_M=0.0057.

Юго-восточнее Памиро-Каракорумского сдвига расположены Пограничная и Фронтальная надвиговые зоны Гималаев (рис. 1), сопряженные с молодыми складками предгорного прогиба [Трифонов и др., 2002]. К.С. Валдия [Valdiya, 1986] оценивает величину современного меридионального горизонтального укорочения в зоне Фронтального надвига в 10–15 мм/год (повторные геодезические наблюдения на правобережье р. Ганга западнее г. Дехрадун дали 1–5.6 мм/год), в зоне Главного пограничного разлома 5–7 мм/год (согласно геодезическим наблюдениям севернее г. Амбалы 4.7–5.7 мм/год) и по частично активизированному новейшему Главному центральному надвигу до 3 мм/год [Трифонов и др., 2002].

Разлом Фронтальный Гималаев (азимут разлома 120°): ξ=0.94, η=1.061, ξ_M =1.7, η_M =0.56. Для разлома Фронтальный Гималаев при расчете получаем левый сдвиг по данным с привлечением величины сейсмического момента землетрясений и правый сдвиг – по данным без учета этого параметра. В данном случае получаем неоднозначность в определении правого и левого сдвига, тем более, что этот разлом по геологическим материалам является надвиговым.

Главный пограничный Гималаев разлом (азимут разлома 90°): ξ=1.67, η=0.596, ξ_M =0.6, η_M =1.5. Неоднозначность выясняется и при расчете для Главного пограничного разлома Гималаев. Вычисляется правый сдвиг с привлечением величины сейсмического момента землетрясений и левый сдвиг – по данным без учета этого параметра.

ВЫВОДЫ

Для ряда активных разломов Центральной Азии по сейсмологическим материалам определено следующее: правосторонние сдвиги характерны для Таласо-Ферганского и Памиро-Каракарумского разломов, левосторонние – для разломов Кепинг, Алтынтагский, Чангма-Килианский, Арнимакинг, Ксианшухе, Чаманский. Разломы надвигового типа показывают неоднозначность при расчетах, что можно трактовать как, практически, отсутствие сдвиговой составляющей. Таким образом, разломы, имеющие сдвиговую составляющую по кинематике геологических материалов, достаточно уверенно подтверждаются расчетами по данным механизмов очагов землетрясений, произошедших в зоне разлома.

Работа выполнена при поддержке ФНИ 0331-2019-0006.

ЛИТЕРАТУРА

Баженов М.Л., Миколайчук А.В. Формирование структуры Центральной Азии к северу от Тибета в кайнозое: синтез палеомагнитных и геологических данных // Геотектоника. – 2004. – № 5. – С. 68–84.

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – № 8 (4). – С. 711–736.

Борняков С.А., Шерман С.И. Многоуровневая самоорганизация деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, № 4. – С. 107–115.

Буртман В.С., Скобелев С.Ф., Сулержицкий Л.Д. Таласо-Ферганский разлом: Современные смещения в Чаткальском районе Тянь-Шаня // ДАН СССР. – 1987. – Т. 296, № 5. – С.1173–1176.

Корженков А.М., Абдиева С.В., Буртман В.С., Орлова Л.А., Раст Д., Тибальди А. Следы землетрясений позднего средневековья в зоне Таласо-Ферганского разлома, Тянь-Шань // Геотектоника. – 2013. – № 6. – С. 84–94

Кучай О.А. Деформации и смещения блоков земной коры внутриконтинентальных орогенов (по данным о механизмах очагов землетрясений) // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 242–246.

Кучай О.А., Дядьков П.Г. Оценка характера тектонического смещения в зонах разломов Алтая по данным о механизмах очагов землетрясений // Геофизические технологии. – 2018. – № 4. – С. 4–9. doi: 10.18303/2619-1563-2018-4-1.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 407 с.

Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с. (Тр. ГИН РАН; вып. 541).

Valdiya K.S. Neotectonic activities in the Himalayan belt // Proc. Intern. Sympos. on Neotectonics in South Asia, February 18–21, 1986. – Dehradun, 1986. – P. 241–261.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

КУЧАЙ Ольга Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: механизмы очагов землетрясений, сейсмотектонические деформации по данным механизмов очагов землетрясений.

Геофизические технологии, № 3, 2020, с. 38–47 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619–1563–2020–3–38 УДК 902.21

АЭРОФОТОСЪЕМКА С БПЛА В ПОИСКОВЫХ ЗАДАЧАХ АРХЕОЛОГИИ: ОБЗОР И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

Е.В. Балков[1], Ю.Г. Карин[1], О.А. Позднякова[2], И.О. Шапаренко[1], Д.А. Гоглев[3]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
[2]Институт археологии и этнографии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 17, Россия,
[3]Группа компаний «Геоскан», 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22Л, Россия
e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru

На примере археологических памятников Аул-Кошкуль-1 и Новая Курья 1, расположенных на территории Новосибирской области, показана эффективность аэрофотосъемки с БПЛА при обнаружении слабовыраженных в рельефе археологических объектов. Рассмотрен мировой опыт использования аэрофотосъемки с БПЛА применительно к решению поисковых археологических задач, приведен краткий обзор используемых аппаратных средств. Подробно описан эффективный способ получения ортофотопланов и карт относительных высот дневной поверхности, позволивший выявить новые археологические объекты на территории исследуемых памятников.

Аэрофотосъемка; ортофотоплан; цифровая модель рельефа; археологические памятники; курганы

UAV PHOTOGRAPHY IN SEARCH PROBLEMS OF ARCHEOLOGY: OVERVIEW AND PRACTICAL EXAMPLES

E.V. Balkov[1], Yu.G. Karin[1], O.A. Pozdnyakova[2], I.O. Shaparenko[1], D.A. Goglev[3]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
[2]Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, Lavrentiev Ave., 17, Novosibirsk, 630090, Russia,
[3]Geoscan Group, Polytechnic St., 22L, St. Petersburg, 194021, Russia
e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru

The archaeological sites Aul-Koshkul-1 and Novaya Kurya 1 located on the territory of the Novosibirsk region were studied. The effectiveness of UAV photography in detection of archaeological objects that are weakly expressed in the relief is shown. The world experience of using UAV photography in relation to the solution of search archaeological problems is considered, a brief overview of the hardware used is given. An effective method of obtaining orthophotoplans and relative elevation maps of the day surface is described in detail. This method makes it possible to identify new archaeological objects on the territory of the studied sites.

UAV photography; orthophotoplan; digital elevation model; archaeological objects; mounds

ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI в. стали общедоступны данные дистанционного зондирования (ДДЗ) [Гарбузов, 2003]. Для использования в археологии ДДЗ имеют большой масштаб и служат в основном для общего планирования работ. Но благодаря современным технологическим возможностям даже

© Е.В. Балков, Ю.Г. Карин, О.А. Позднякова, И.О. Шапаренко, Д.А. Гоглев, 2020

крупномасштабные ДДЗ можно дешифрировать и обнаруживать новые археологические объекты [Сидорина и др., 2018].

Развитие гражданских версий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет выполнять аэрофотосъемку и получать информацию о строении земной поверхности с высокой детальностью и точностью за считанные минуты [Быков и др., 2013, 2015]. С помощью установленной на БПЛА камеры производится фотографирование с различных ракурсов по плотной сетке с высоким процентом перекрытия снимков. С развитием компьютерных инструментов появилась возможность автоматизировать традиционно трудоемкие процессы фотограмметрии в специализированных программах [Тихонов, Акматов, 2018]. Благодаря этому получаемые в результате ортофотопланы и цифровые модели рельефа (в английской литературе Digital Elevation Model, DEM) позволяют сократить временные и финансовые затраты на поисковые археологические работы. В некоторых случаях получаемая ландшафтная модель местности, сопровождаемая детальной фотографической и топографической информацией [Быков и др., 2014; Alvarez et al., 2020], имеет высокую информативность, сопоставимую с информативностью геофизических методов исследования.

В мировой практике аэрофотосъемка зачастую используется для 2D и 3D моделей зданий, культурных объектов или памятников [López et al., 2016; Adami et al., 2019]. В настоящее время на БПЛА в некоторых случаях используются датчики с технологией определения дальности с помощью оптических систем – LiDAR [Liu, 2008]. Эта технология применяется для получения более точных цифровых моделей рельефа [Poirier, 2020] и позволяет избавляться от влияния растительности на карту высот [Themistocleous, 2019]. Есть данные, что полет на малой высоте приводит к лучшему прохождению сквозь растительность и, как следствие, к улучшенным возможностям фильтрации данных, так как отражения будут происходить от реальной поверхности земли, а не от верхней части растительности [Risbøl, Gustavsen, 2018].

Беспилотные летательные аппараты с вертикальным взлетом (квадро-, гексо-коптеры и т. п.) в отличие от БПЛА самолетного типа, не требуют дополнительных средств для взлета и посадки, более маневренны, а современное программное обеспечение (ПО) делает их легкими в управлении и настройке.

Лидером среди достаточно большого числа зарубежных производителей мультикоптеров (дронов) для аэрофотосъемки является компания DJI (Китай, https://www.dji.com). На рисунке 1 приведены примеры широко используемых при аэрофотосъемке моделей любительских квадрокоптеров [Balkov et al., 2020; Yurkevich et al., 2020]. Их особенностями являются небольшие габариты, малый вес, хорошая система стабилизации и навигации, позволяющая проводить съемку даже в достаточно сильный ветер (до 5–6 м/с из личного опыта). Стоимость подобных аппаратов относительно не велика, поэтому они получили массовое распространение.

Рис. 1. Любительские дроны для аэрофотосъемки: DJI Phantom 4 (слева), DJI Mavic Air (в центре), Xiaomi Mi Drone (справа)

Среди отрицательных качеств можно назвать небольшую продолжительность полета (около 10–15 минут), малую грузоподъемность, что не позволяет установить камеры высокого разрешения или дополнительное оборудование.

На рынке также широко представлены профессиональные мультикоптеры для аэрофотосъемки промышленного класса. Здесь можно выделить разработки упомянутой выше компании DJI и отечественной компании ГК «Геоскан» (Санкт-Петербург, https://www.geoscan.aero), выпускающей широкую линейку профессиональных БПЛА (рис. 2). Такие аппараты способны поднимать груз до нескольких килограмм, стоимость их значительно выше, но и время полета достигает нескольких десятков минут. К примеру, время полета квадрокоптера компании «Геоскан» с профессиональным фотоаппаратом серии 401 достигает 60 минут.

На подобное шасси возможно установить не только профессиональные фотокамеры, но и другое оборудование, например, LiDAR, магнитометры или георадары [Liu, 2008; Гоглев, 2018; Cabrera, 2018].

Рис. 2. Профессиональные дроны для аэрофотосъемки: DJI MATRICE 600 PRO (слева), DJI Inspire 2 (в центре), Геоскан 401 (справа)

Целью настоящей работы является демонстрация эффективности применения аэрофотосъемки с использованием современных технических и программных средств при исследовании археологических объектов, имеющих слабую выраженность в рельефе, на примере двух археологических памятников, расположенных на территории Новосибирской области. К задачам отнесены: краткий обзор технических, программных средств и методики обработки, используемых при аэрофотосъемке и обработке материалов; описание оригинальной методики построения карт относительных высот, повышающей эффективность анализа моделей цифрового рельефа; демонстрация практических примеров применения аэрофотосъемки с БПЛА и результатов интерпретации обработанных данных.

АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Коллектив авторов на базе Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН располагает в настоящий момент компактным дроном DJI Mavic Air (см. рис. 1.), позволяющим оперативно выполнять аэрофотосъемку. Также проведена закупка комплекса Геоскан 401 – Геофизика, включающего в себя комплект для аэрофотосъемки.

При работах с помощью DJI Mavic Air для планирования полетов используется программа Drone Harmony Plus (https://droneharmony.com), для обработки данных фотограмметрии применяется ПО Metashape (Agisoft, Россия, https://www.agisoft.com/). Обработка, оформление и визуализация цифровых моделей рельефа и карт относительных высот проводится в программе Surfer (Golden Software, США, https://www.goldensoftware.com).

Рассматриваемые в статье результаты аэрофотосъемки получены в ходе работ 2019–2020 гг. сотрудниками ИНГГ СО РАН с помощью дрона DJI Mavic Air, а также оборудованием ГК «Геоскан» с привлечением специалистов компании.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОРТОФОТОПЛАНОВ, ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И КАРТ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВЫСОТ

Процедура обработки фотографических данных, получаемых после облета исследуемого участка, включает четыре основных этапа, в полной мере автоматизированных в используемом ПО Metashape [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf]:

1) ориентирование и выравнивание ортофотоснимков по общим точкам и определение параметров съемки (положение камеры, ориентация, внутренняя геометрия и др.), в результате получается разреженное облако общих точек в трехмерном пространстве создаваемой модели;

2) построение плотного облака точек;

3) построение карты высот (в ПО предусмотрена возможность выгрузки (экспорта) карты высот в различных форматах: растровые изображения, форматы для загрузки в пакеты GIS, цифровая информация о рельефе для обработки в сторонних программных средствах и т. п.);

4) заключительный этап – построение ортофотоплана. Ортофотоплан – это фотографическое изображение дневной поверхности, построенное из набора выровненных фотоснимков. Ортофотоплан может быть экспортирован в различных растровых форматах, в том числе с геопривязкой. Также он может быть экспортирован в форматах для последующей загрузки в различные пакеты GIS, где ортофотоплан может быть спроецирован на поверхность карты высот.

Для визуализации, обработки, анализа и интерпретации данных цифровой модели рельефа, выгруженных в числовом виде из ПО Metashape, в данной работе используется программа Surfer, которая позволяет выполнять ряд математических преобразований входных данных и имеет широкий набор средств визуализации. На примере обработки результатов аэрофотосъемки участка (площадью около 10 Га) курганного могильника Аул-Кошкуль-1, рассмотрим порядок построения карты относительных высот, которая является эффективным способом визуализации данных цифровой модели рельефа.

Поскольку естественный рельеф поверхности на исследуемом участке памятника имеет перепад высот в несколько метров, а интересующие объекты – от первых десятков сантиметров до 1 м, целесообразно из построенной карты абсолютных высот исключить рельеф поверхности. Это осуществляется в три этапа:

1) по данным цифровой модели рельефа с помощью функции Grid строится плотная регулярная сетка точек, шаг между которыми подбирается так, чтобы детальность карты позволяла выделять интересующие объекты. Для рассматриваемого объекта карта абсолютных высот после интерполяции методом линейной триангуляции содержит примерно 10000 × 9600 точек для участка площадью около 10 Га;

2) с помощью функции Extract производится прореживание данных цифровой модели рельефа и с помощью функции Grid (методом аппроксимации Kriging) построение сглаженной карты абсолютных высот;

3) вычитание сглаженной карты высот из исходной карты абсолютных высот с помощью функции Math и построение разностной карты относительных высот.

На рисунке 3 показаны исходная карта абсолютных высот, сглаженная карта, и карта относительных высот исследуемого участка. Выраженный естественный рельеф исходной карты осложняет подбор единой цветовой гаммы для выделения искомых объектов. Карта относительных высот (высотных аномалий) имеет диапазон высот от –0.7 до 0.7 м, в то время как диапазон высот для исходной карты 81–85 м. При этом перепад высот для курганных рвов составляет всего 0.1–0.3 м. Существенно проще выделить объект с перепадом высот в 0.1–0.3 м на карте с общим перепадом 1.4 м. Из рисунка 3 видно, что детальность карты относительных высот представлена лучше, чем исходная карта абсолютных высот. В результате детального анализа аномальной карты высот было выделено более 20 перспективных археологических объектов (курганов, кольцевых рвов и валов), примерно половина из которых не была выявлена в ходе исследований предыдущих лет [Молодин и др., 2010; Эпов и др., 2017].

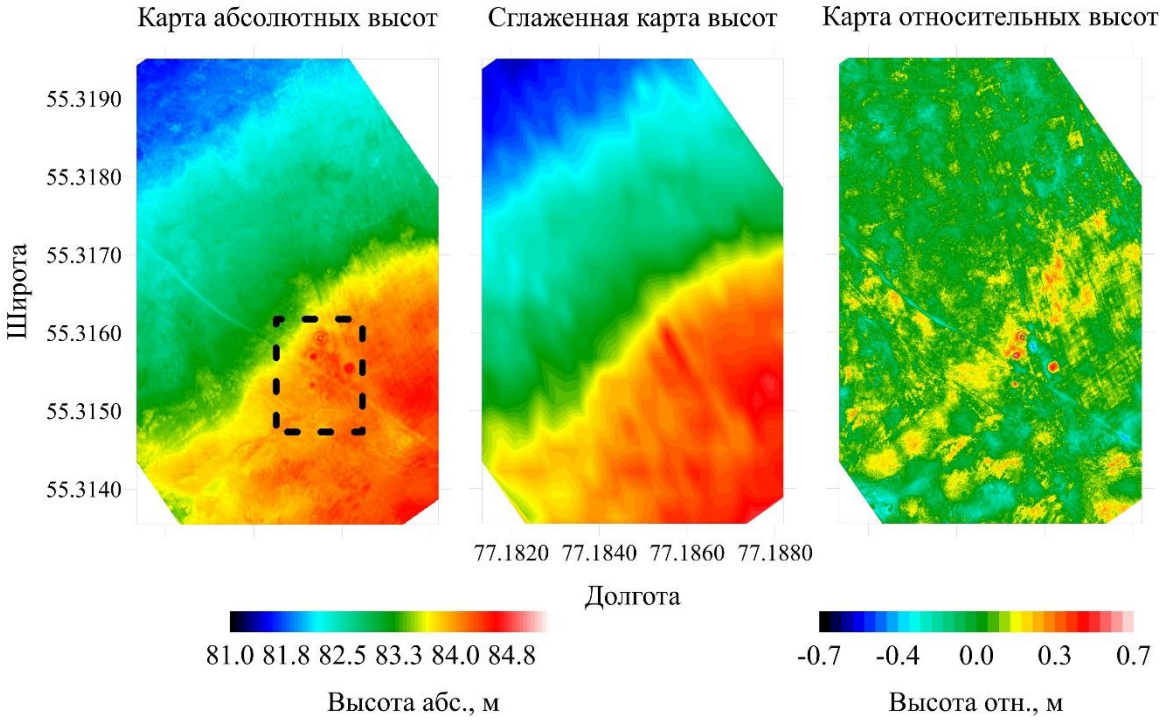

Рис. 3. Карты высот участка курганного могильника Аул-Кошкуль-1

ДЕТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКАХ АУЛ-КОШКУЛЬ-1 И НОВАЯ КУРЬЯ 1

Археологические памятники Новая Курья 1 и Аул-Кошкуль-1 представляют собой курганные могильники, время сооружения которых относится к раннескифской (VIII–VII вв. до н. э.) и древнетюркской эпохам (IX–XI вв. н. э.) [Молодин и др., 2010; Марченко и др., 2019]. Особенностью данных комплексов является слабая выраженность насыпей в рельефе по причине многолетней распашки.

На рисунке 4 показаны фрагменты карты относительных высот курганного могильника Аул-Кошкуль-1 и ортофотоплана исследуемой местности (фрагмент обозначен пунктиром на рис. 3). По данным исследований предыдущих лет в результате магнитной и аэромагнитной съемки были выделены восемь курганов [Молодин и др., 2010; Эпов и др., 2017], при этом магнитная съемка покрывала относительно небольшой участок площадью около 1 Га. По результатам аэрофотосъемки отчетливо

выделяются шесть из восьми курганов, найденных ранее и имеющих выраженные в рельефе насыпи (отмечены красными линиями на рис. 4). Кроме того, отчетливо проявляются на карте относительных высот и ортофотоплане три новых объекта, ограниченных рвами и не имеющих выраженных центральных насыпей (отмечены черными линиями на рис. 4). Полученные результаты демонстрируют, что все подобные курганы сконцентрированы в западной части памятника, и это позволяет поставить вопрос о не одновременном сооружении данного комплекса, который ранее рассматривался только как могильник древнетюркского времени.

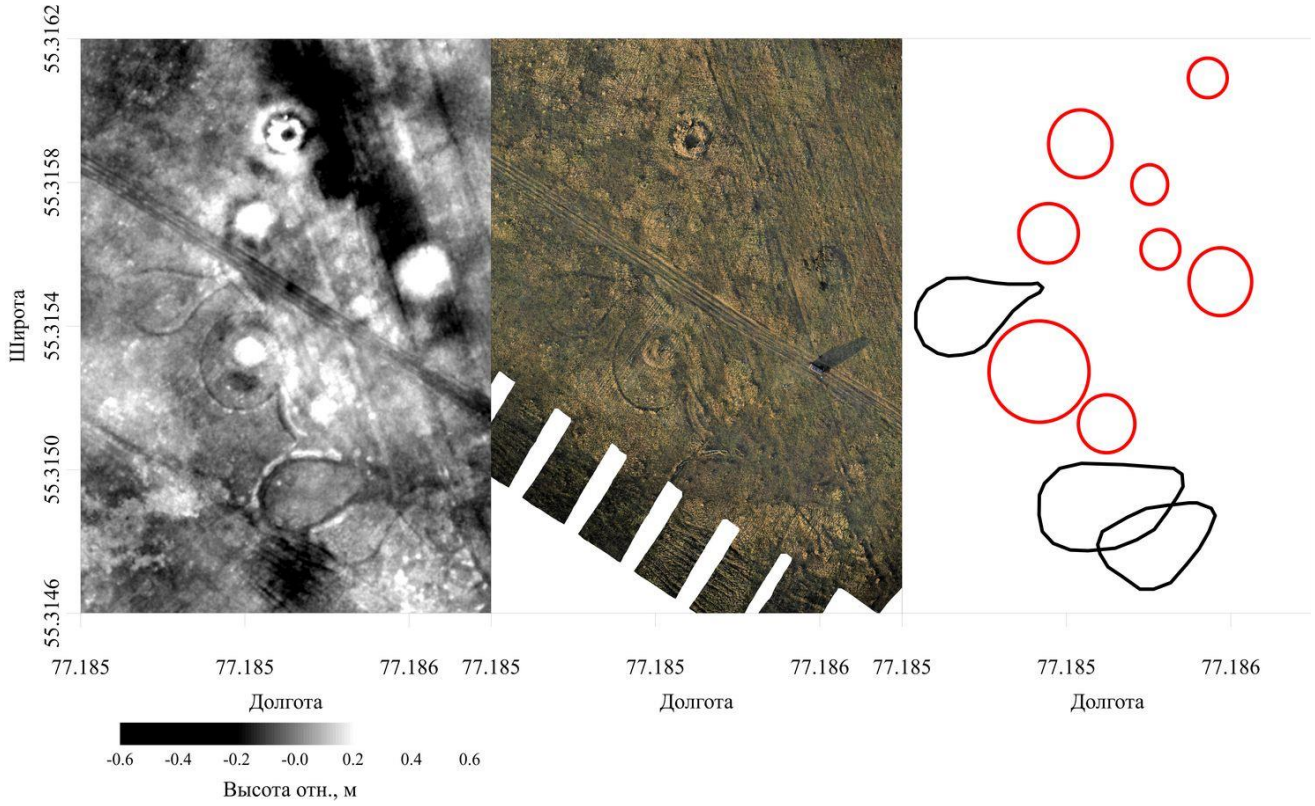

Рис. 4. Карта относительных высот (слева), ортофотоплан (в центре) и схема выявленных объектов (справа) археологического памятника Аул-Кошкуль-1. Красными линиями обозначены объекты, обнаруженные магнитометрической съемкой. Черными линиями показаны объекты, выделенные по цифровой модели рельефа и ортофотоплану

На рисунке 5 представлен фрагмент карты относительных высот и ортофотоплан исследуемого участка памятника Новая Курья 1. В ходе исследований предыдущих лет методом магнитометрии в наземном и аэро-вариантах [Балков и др., 2019], было обнаружено 11 курганов (выделены на рис. 5 красными линиями), семь из которых (обозначены сплошными линиями) выражены в рельефе. Последние на карте относительных высот (рис. 5) проявляются в виде аномалий оттенков красного цвета. Вскрытый раскопом курган в центре площадки имеет высоту ниже дневной поверхности, поэтому на карте обозначен оттенками синего и зеленого цветов. Анализ карты относительных высот позволил выделить две новые, слабовыраженные в рельефе и ранее не обнаруженные насыпи, которые могут быть предварительно интерпретированы как курганы (отмечены линиями черного цвета). Как видно из ортофотоплана на данном памятнике в результате повреждения верхнего дернового слоя пашней, визуально ни одна насыпь не выделяется, и основную информацию несет цифровая модель рельефа.

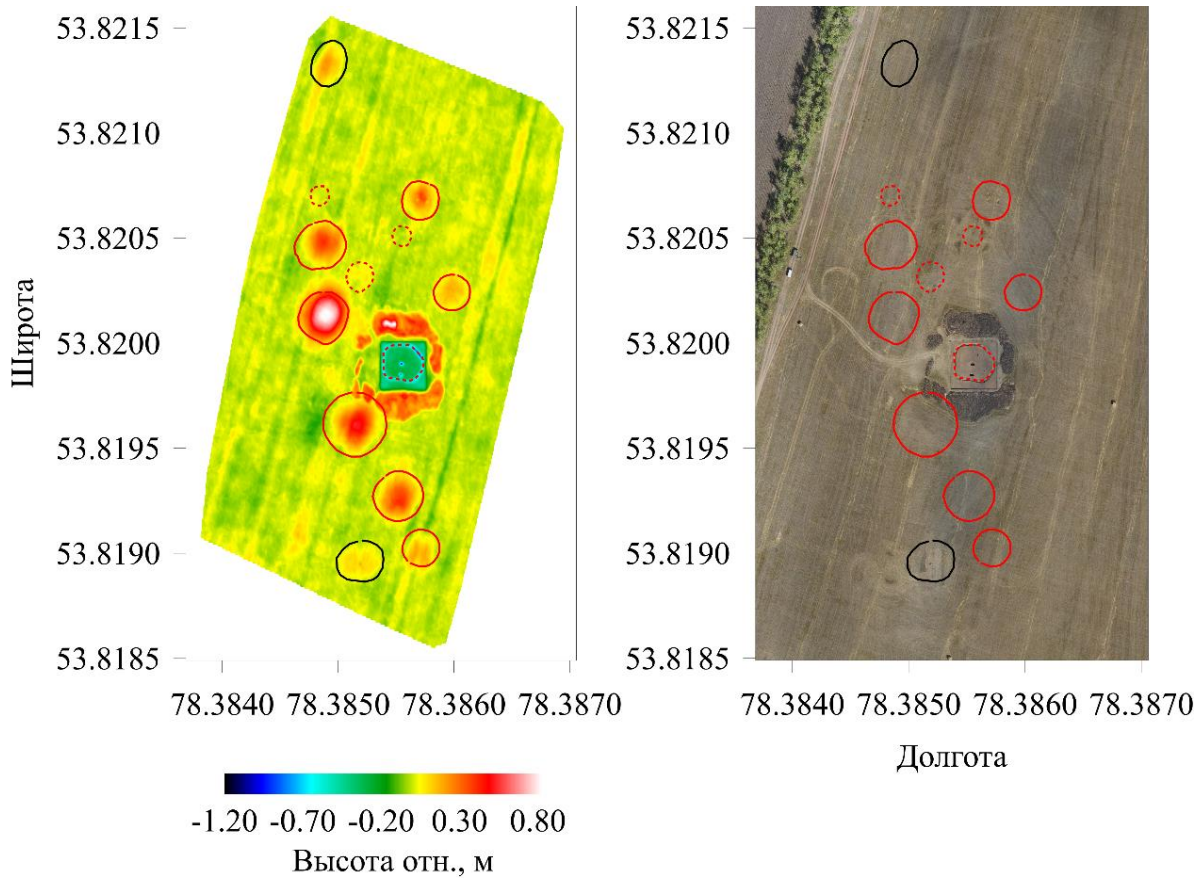

Рис. 5. Карта относительных высот (слева) и ортофотоплан (справа) участка археологического памятника Новая Курья 1. Красным цветом выделены курганы, обнаруженные в ходе исследований предыдущих лет методом магнитометрии, черным – новые, обнаруженные объекты

ВЫВОДЫ

Аэрофотосъемка, выполняемая с применением современных технических и программных средств, является эффективным и оперативным инструментом для анализа фотографической информации и микрорельефа на территории археологических памятников. Предложенный и опробованный на практике подход к построению карт относительных высот снижает влияние естественного рельефа местности и подчеркивает высотные аномалии, связанные с деятельностью человека, тем самым повышая эффективность анализа данных цифровой модели рельефа. В результате применения такого подхода на двух археологических памятниках Новосибирской области были выявлены ранее неизвестные археологические объекты, а первоначальное представление об устройстве этих комплексов существенно изменилось. В частности, на памятнике Новая Курья 1 обнаружены новые курганы, а на памятнике Аул-Кошкуль-1 выявлены новые ритуальные сооружения, относящиеся по всей видимости к другой культуре, по сравнению с курганами, обнаруженными ранее методом магнитометрии. Перспективами дальнейшего развития данного направления являются: применение профессиональных моделей БПЛА и фототехники, использование технологии определения дальности с помощью оптических систем (LiDAR) для минимизации влияния растительности и, безусловно, комплексирование с различными геофизическими методами.

Исследования выполнены при частичном финансировании РФФИ (грант №17-29-04314).

ЛИТЕРАТУРА

Балков Е.В., Дядьков П.Г., Позднякова О.А., Кулешов Д.А., Марченко Ж.В., Гришин А.Е., Евменов Н.Д., Карин Ю.Г., Гоглев Д.А. Высокоточная магнитная съемка с использованием БПЛА при поиске и исследовании курганов археологического памятника Новая Курья в Западной Сибири // Вестник НГУ. Серия IT. – 2019 – № 4. – С. 5–12, doi: 10.25205/1818-7900-2019-17-4-5-12.

Быков А.Л., Костюк А.С., Быков В.Л., Быков Л.В., Татаурова Л.В., Орлов, П.В., Погарский П.М. Применение материалов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для картографического обеспечения археологических работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 139–144.

Быков А.Л., Костюк А.С., Быков В.Л., Быков Л.В., Татаурова Л.В., Орлов П.В., Погарский П.М. Геодезическое обеспечение археологических работ с применением БПЛА и методов стереофотограмметрии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 41–45.

Быков Л. В.Татаурова, Л.В., Орлов П.В., Анисимов А.Е., Полухин Р.Л., Бартенев С.В. Геодезические работы на археологическом памятнике XVII-XVIII века «Ананьино» // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 64–67.

Гарбузов Г.П. Археологические исследования и дистанционное зондирование Земли из космоса // Российская археология. – 2003. – № 2. – С. 45–55.

Гоглев Д.А. Маловысотная аэромагнитная съемка с применением беспилотных воздушных систем на базе квадрокоптера в археологии // Геопрофи. – 2018. – Т. 6. – С. 20–22.

Марченко Ж.В., Гришин А.Е., Позднякова О.А., Дядьков П.Г., Евменов Н.Д., Кокорев Ф.В., Гнездилова И.С., Понедельченко Л.О. Новый курганный могильник Новая Курья-1 в Северной Кулунде // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – 2019. – Т. 25. – С. 448–456, doi: 10.17746/2658-6193.2019.25.448-456.

Молодин В.И., Фассбиндер Й.В.Е., Горка Т., Позднякова О.А., Чемякина М.А., Дураков И.А., Хансен С., Наглер А. Новый могильник древнетюркского времени Аул-Кошкуль-1 в Барабинской лесостепи: геофизические исследования // Вестник НГУ. Серия: История, филология. – 2010. – Т. 9. – Вып. 7: Археология и этнография. – С. 46–56.

Сидорина И.Е., Позднякова Н.А., Кружилина А.А., Поляков А.В. Применение ДЗЗ в геоинформационном картографировании для археологических исследований // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 141–150, doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-141-150.

Тихонов А.А., Акматов Д.Ж. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 192–198, doi: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-192-198.

Эпов М.И., Молодин В.И., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Позднякова О.А. Применение высокочастотного аэромагнитного комплекса на базе беспилотного летательного аппарата для поиска археологических объектов // Труды V (XXI) Всероссийского археологического съезда в Барнауле-Белокурихе в 3 томах. – 2017. – Т. 3. – С. 89–92.

Adami A., Fregonese L., Gallo M., Helder J., Pepe M., Treccani D. Ultra light UAV systems for the metrical documentation of cultural heritage: applications for architecture and archaeology // Proc. 6th International Workshop LowCost 3D–Sensors, Algorithms, Applications. – 2019. – Vol. 42. – P. 15–21.

Alvarez Larrain A., Greco C., Tarragó M. Participatory mapping and UAV photogrammetry as complementary techniques for landscape archaeology studies: an example from north-western Argentina // Archaeological Prospection. – 2020. – P. 1–15, doi: 10.1002/arp.1794.

Balkov E.V., Karin Y.G., Pozdnyakova O.A., Dyadkov P.G. Modern unmanned technology in archaeogeophysical studies // Engineering and Mining Geophysics 2020: Conf. Proc. – EAGE, 2020. – Vol. 2020, № 1. – P. 1–11, doi: 10.3997/2214-4609.202051087.

Cabrera R.A., Bekic G. Drone-borne ground-penetrating radar suitability for specific surveys: a comparative study of feature sizes versus antenna frequency and elevation over the ground // First Break. – 2018. – Vol. 36, No. 8. – P. 83–89.

Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues // Progress in physical geography. – 2008. – Vol. 32, № 1. – P. 31–49.

López J.A.B., Jiménez G.A., Romero M.S., García E.A., Martín S.F., Medina A.L., Guerrero J.A.E. 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain) //Journal of Archaeological Science: Reports. – 2016. – Vol. 10. – P. 495–506, doi: 10.1016/j.jasrep.2016.11.022.

Poirier N., Baleux F., Calastrenc C. The mapping of forested archaeological sites using UAV LiDaR. A feedback from a south-west France experiment in settlement & landscape archaeology // Archéologies numériques. – 2020. – Vol. 4, №. 2. – P. 1–24, doi: 10.21494/ISTE.OP.2020.0556.

Risbøl O., Gustavsen L. LiDAR from drones employed for mapping archaeology // Potential, benefits and challenges. Archaeological Prospection. – 2018. – P. 1–10, doi: 10.1002/arp.1712.

Themistocleous K. DEM modeling using RGB-based vegetation indices from UAV images // Proc. Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019). – International Society for Optics and Photonics – 2019. – Vol. 11174. – P. 111741J, doi: 10.1117/12.2532748.

Yurkevich N., Yurkevich N., Bortnikova S., Karin Y. Current State of the Abandoned Mine Wastes: Environmental Risks, Prospects for Extraction and Reclamation // Abstracts of The Second Eurasian RISK-2020 Conference and Symposium (12–19 April 2020; Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia). – 2020. – P. 153–154, doi: 10.21467/abstracts.93.83.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БАЛКОВ Евгений Вячеславович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: разработка программных и аппаратных средств для малоглубинных электроразведочных методов, комплексные инженерно- и археолого-геофизические изыскания.

КАРИН Юрий Григорьевич – научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: разработка и макетирование малоглубинной электроразведочной аппаратуры, комплексные инженерно- и археолого-геофизические изыскания.

ПОЗДНЯКОВА Ольга Анатольевна – научный сотрудник ИАЭТ СО РАН. Основные научные интересы: археология эпохи развитой бронзы Западной Сибири, геофизические методы изучения археологических памятников.

ШАПАРЕНКО Илья Олегович – младший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: применение методов электроразведки для изучения

и мониторинга разломных структур и суффозионно-просадочных явлений, археолого-геофизические исследования.

ГОГЛЕВ Дмитрий Алексеевич – инженер-геофизик, руководитель проекта аэромагнитная съемка с БПЛА группы компаний «Геоскан». Основные научные интересы: аэрофотосъемка и магнитометрия для поисков и разведки полезных ископаемых, изучения археологических памятников, инженерных и картографических работ.