

УДК 550.361:631.3:001.89

Сопряженный мониторинг теплового поля Земли для исследования геотермальных энергоресурсов Дагестана

Н.М. Булаева^{1*}, М.Н. Дадашев², Е.Б. Григорьев³

¹ ООО «Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов», Российская Федерация, 367027, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Селивантьева, д. 2

² РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1

³ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

* E-mail: bulaeva_nurjagan@mail.ru

Тезисы. В работе представлены результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований температурного поля земной коры на территории Республики Дагестан, в том числе сводная цифровая карта месторождений и перспективных площадей геотермальных ресурсов Дагестана, полученная с использованием современных геоинформационных систем. Проведенные исследования доказали целесообразность применения дистанционных данных для исследования геотермальных энергоресурсов Дагестана. Большим преимуществом разрабатываемых технологий является возможность сопряжения разного рода данных. Показано, что кроме карты термальных площадей Дагестана с помощью 3D-моделей и систем интеграции данных дистанционные данные можно совмещать с результатами геодинамических исследований и просматривать связь с разломной тектоникой и т.д., повышая таким образом достоверность результатов научных исследований и получая новые знания о регионе. Сопоставительный анализ результатов сопряженного (подземно-наземно-аэрокосмического) мониторинга запасов геотермальных ресурсов, нефти и газа в рамках космобиоритмических циклов различной продолжительности позволит перейти к 4D-моделированию современных геофизических процессов.

Ключевые слова: температурное поле, земная кора, аэрокосмический мониторинг, нефть и газ, геоинформационные технологии, Республика Дагестан, 3D-модели, цифровая карта, сопряженный мониторинг, тектоника, геотермальные ресурсы, геофизические процессы.

Сегодня масштабы и темпы ухудшения состояния окружающей среды в результате антропогенного и техногенного воздействия настолько велики, что охватить наземными исследованиями огромные площади в единый момент времени не представляется возможным. В связи с этим одна из основных задач геоэкологии на данном этапе – это разработка, создание и использование современной приборной базы и технологий для мониторинга запасов геотермальных ресурсов нефти и газа и комплексной оценки техногенной обстановки окружающей среды с целью принятия соответствующих решений по обеспечению и сохранению природного равновесия в экосистемах.

В основу предлагаемого метода сопряженного мониторинга теплового поля земной коры на территории Республики Дагестан в условиях глобальных изменений окружающей среды легли результаты целенаправленных изысканий в области геофизических методов и технологий. Так, многоуровневые исследования теплового поля Земли – наземные измерения, приповерхностные измерения температуры, измерения температуры по данным глубокого бурения и дистанционное зондирование Земли с применением тепловой инфракрасной аэросъемки (ТИКАС) – позволяют ставить и решать задачу оценки природных ресурсов, например, по Тарумовской площади Дагестана. Полученные в 1985–1986 гг. данные ТИКАС Северного полигона площадью 105×60 км² в Кизляре легли в основу разработанного Н.М. Булаевой метода дистанционного фрагментирования земной коры (на примере Дагестана) [1].

В дальнейшем космический мониторинг приповерхностного теплового поля Земли позволил по-новому организовать научные исследования с целью получения конкретных данных и решения важнейших прикладных задач мониторинга природных ресурсов и прогнозирования возможных экологических последствий воздействия антропогенных и техногенных факторов. Результатом работ и стал предлагаемый

метод сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов [2–6].

Решаемые мониторинговые задачи основываются на следующих данных:

- космических снимках в инфракрасном диапазоне;
- приповерхностной геотерморазведке (до глубины 3 м);
- геотермических исследованиях скважин малой глубины (до 50 м);
- данных геофизических исследований глубоких скважин.

Системная организация комплексного мониторинга предопределяет необходимость совместного выполнения исследований по основным направлениям с соблюдением иерархической соподчиненности и выявлением их взаимосвязей и взаимозависимостей. Тем самым намечается минимально необходимый объем информации для решения задач любого направления, а также определяется структура сопряженных баз данных в качестве научно-организационной основы прогнозирования и мониторинга глобальных изменений окружающей среды [3]. При этом особый интерес

представляют результаты обработки космических снимков (КС) в различных диапазонах частот (тепловом и видимом) [7, 8].

Для процесса обработки КС (рис. 1) необходимы:

- программа обработки файлов формата TDF;
- программа визуализации картографических 3D-моделей;
- детализация этапов обработки;
- визуализация КС с помощью 3D-модели.

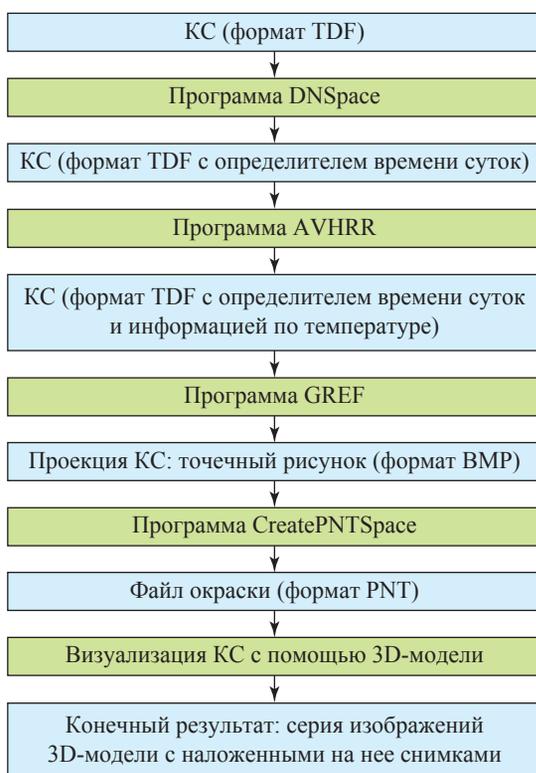
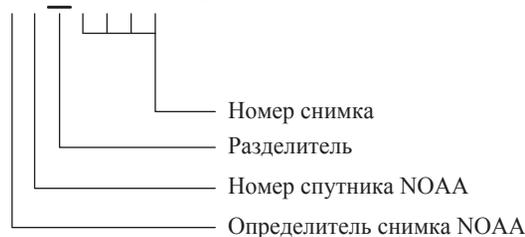
Под «снимком» понимается именно файл формата TDF, поскольку все программы комплекса работают только с такими файлами. В ходе обработки TDF-файла получают файл-проекцию в формате BMP. Все программы хранятся в соответствующих каталогах.

Подготовка снимков к преобразованиям состоит из двух этапов:

- 1) создания каталога обработки снимков – рабочего каталога;
- 2) копирования всех обрабатываемых снимков в рабочий каталог.

Файл формата TDF имеет следующий формат имени:

n3_0783.tdf



□ данные ■ процесс обработки

Рис. 1. Блок-схема процесса обработки КС

Приняты следующие определители снимка: d – дневной (после восхода Солнца); n – ночной (до восхода Солнца); r – на восходе; s – на закате; D – наиболее подходящий дневной; N – наиболее подходящий ночной.

Модель «Дагестан 50000»

Все параметры программы настроены оптимально для модели «Дагестан 50000». Нужно только выбрать снимки и запустить процесс преобразования.

После запуска процесса преобразования КС открывается форма выбора палитры цветов (рис. 2). Границы области обработки задаются в верхней части формы. Границы температур $-30...50$ °C выбраны оптимально: очень редко температуры выходят за пределы данных значений и то только в случае облаков.

Также можно для файла окраски задать цвет фона, который будет использоваться, если в проекции снимка отсутствуют данные.

После выбора палитры запускается процесс преобразования (рис. 3). Длительность процесса прямо пропорциональна размеру BMP-файла.

Для каждого снимка (рис. 4) проводят коррекцию, сформировав файл окраски (рис. 5). На момент запуска формы коррекции файл окраски уже сформирован. Почти на всех снимках четко выделяется граница моря. Коррекция снимка заключается в совмещении границы моря на снимке с береговой линией, отмеченной на рис. 5 пунктиром. Также можно для файла окраски задать цвет фона, который будет использоваться, если в проекции снимка отсутствуют данные.

Коррекция выполняется в трех направлениях:

- 1) смещение по оси X;
- 2) смещение по оси Y;
- 3) поворот относительно точки поворота.

Следует отметить, что почти всегда достаточно только одного смещения снимка. Очень редко (приблизительно в одном случае

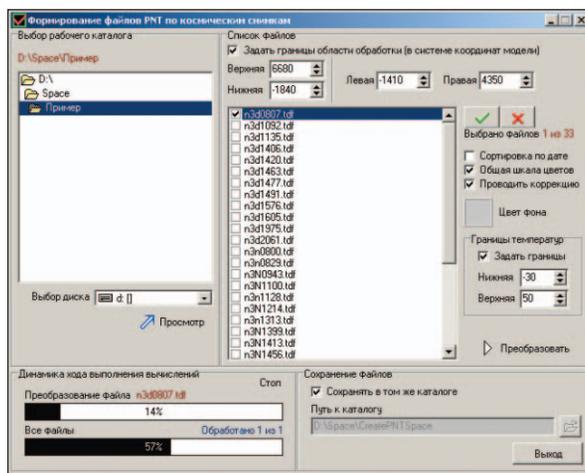


Рис. 2. Форма выбора палитры цветов

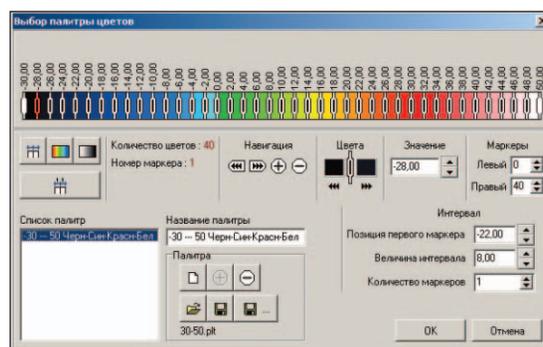


Рис. 3. Ход преобразования снимка

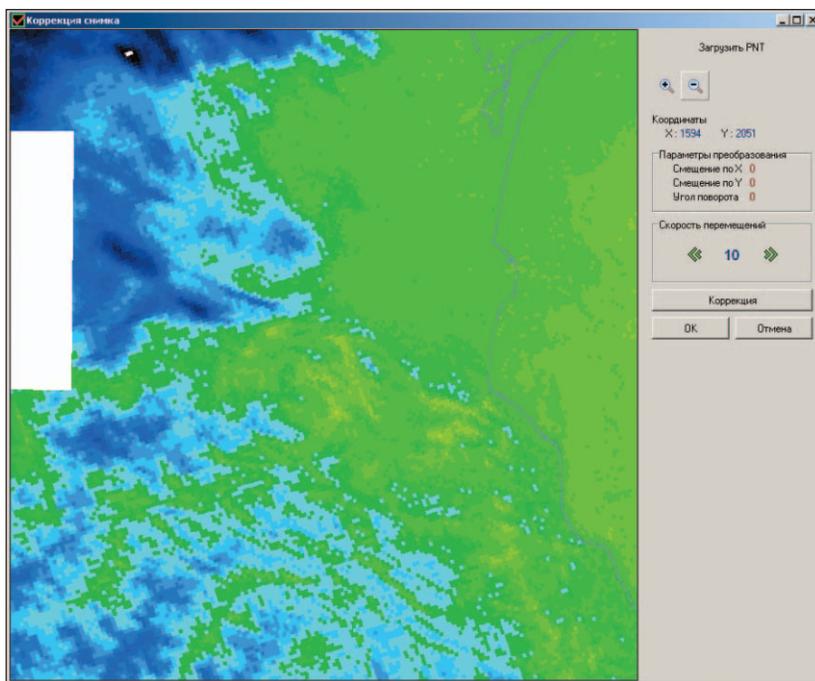


Рис. 4. Загруженный снимок

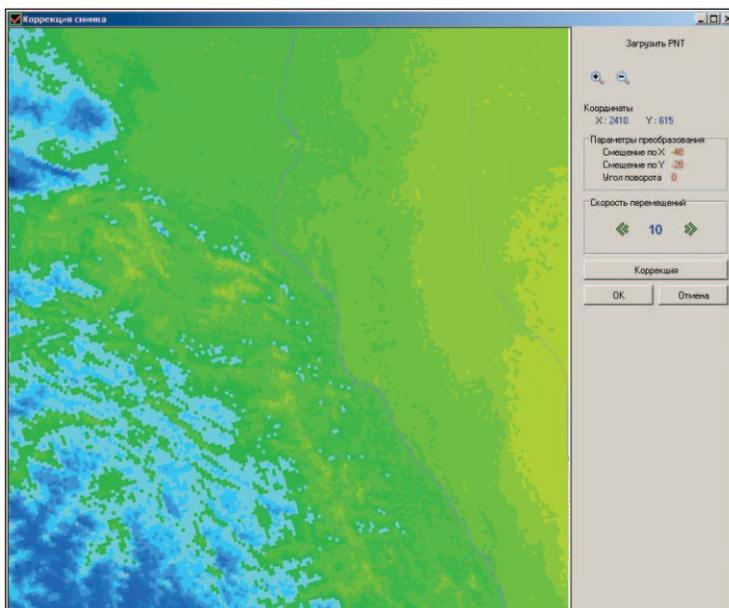


Рис. 5. Скорректированный снимок

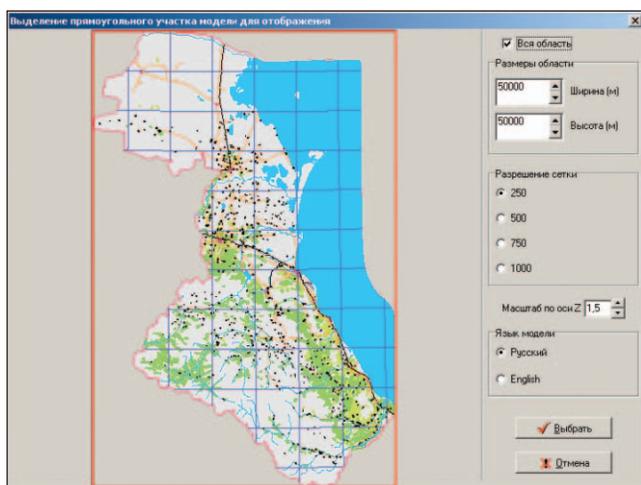


Рис. 6. Каталог Digital_Models, Дагестан

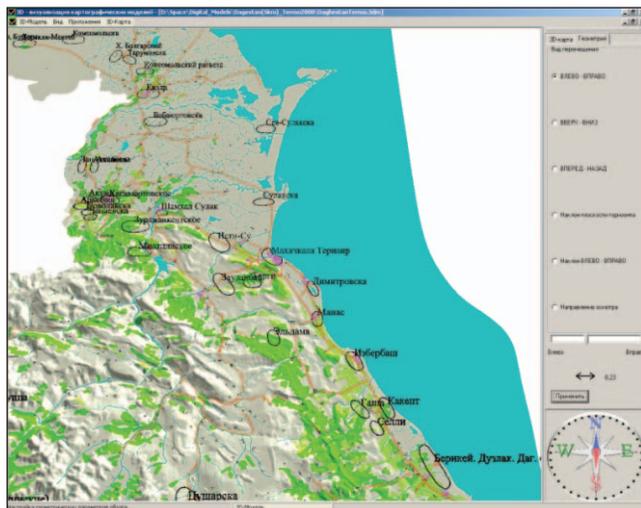


Рис. 7. Отрисовка модели

из двухсот) возникает необходимость выполнить поворот.

Скорректированные снимки (файлы окраски) сохраняют и размещают по каталогам: например, разбивают на дневные и ночные снимки и т.д. Для скорректированных файлов расширение PNTC меняют на PNT.

После завершения обработки KC файлы окраски интегрируют в 3D-модель. Визуализация выполняется с помощью программы 3D-Model/Visual.exe. В каталоге Digital_Models выбирают модель Дагестана (рис. 6) и задают ее ориентацию и положение (рис. 7).

Далее выбирают рабочий каталог (рис. 8). Если в каталоге содержатся файлы формата PNT, то выводится их список. В списке каждый из файлов можно отметить. Отмеченные файлы будут загружены в программу.

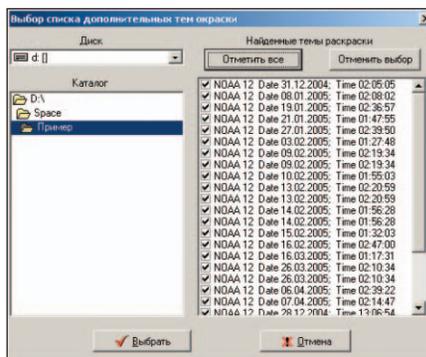


Рис. 8. Рабочий каталог

Процесс визуализации заключается в том, что для каждого выбранного файла окраски поверхности будет построена модель. Полученный рисунок (рис. 9) будет сохранен в виде BMP-файла в рабочем каталоге.

На рис. 10 представлена построенная авторами сводная цифровая карта месторождений и перспективных площадей термальных вод Республики Дагестан [4, 8, 9]. Данные о месторождениях и перспективных площадях термальных вод были интегрированы в 3D-модель Дагестана. Сопоставление и анализ объектов карты с данными дистанционного зондирования с помощью геоинформационных систем (ГИС), разработанных в ООО «Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов», позволит ответить на вопрос, как связаны тепловые аномалии на спутниковых снимках с месторождениями и перспективными площадями термальных вод?

Одним из важнейших направлений деятельности Центра сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов является использование данных дистанционного зондирования для исследования территории Дагестана и Восточного Предкавказья [1, 2, 10–13]. Поэтому с помощью банка дистанционных данных NOAA и системы интеграции дистанционных данных в 3D-модель на 3D-модель

месторождений и перспективных площадей термальных вод Дагестана (см. рис. 10) были наложены КС. На рис. 11 показана лишь небольшая часть снимков за 2005 г., относящихся к южной части Республики Дагестан.

Представленные на рис. 11 изображения достаточно четко показывают, что в пределах контуров некоторых площадей (например, №№ 51, 55, 56, 57, 68) имеются небольшие положительные температурные аномалии. На остальных полученных авторами изображениях некоторые контуры также совпадают с температурными аномалиями, но совпадение не так заметно, как на рис. 11. Конечно, совпадение может носить стохастический характер или являться следствием большого перепада высот в данном районе. Необходимо более детально изучить каждую площадь по снимкам большого разрешения.

Таким образом, на основе полученных результатов исследований температурного поля земли на территории Республики Дагестан авторами впервые построена сводная цифровая карта месторождений и перспективных площадей термальных вод Дагестана (см. рис. 11) [4, 8, 9], которая поможет объяснить связь тепловых аномалий на снимках дистанционного



Рис. 9. Цифровая карта термальных ресурсов



Рис. 10. Месторождения и перспективные площади термальных вод Республики Дагестан

зондирования Земли с месторождениями и перспективными площадями термальных вод.

Большим преимуществом разрабатываемых авторами технологий является возможность сопряжения разного рода данных. Например, кроме сопряжения дистанционных данных с картой термальных площадей Дагестана с помощью 3D-моделей и систем интеграции данных можно совмещать дистанционные данные и результаты геодинамических исследований, просматривать связь

с разломной тектоникой и т.д., повышая таким образом достоверность результатов научных исследований и получая новые знания о регионе.

Экспресс-метод исследования тепловых полей территории Дагестана, в частности геотермальных площадей, в комплексе с аэрокосмическими и богатейшими наземными материалами позволит получить уникальную методику геотермического информационного мониторинга природных ресурсов региона.

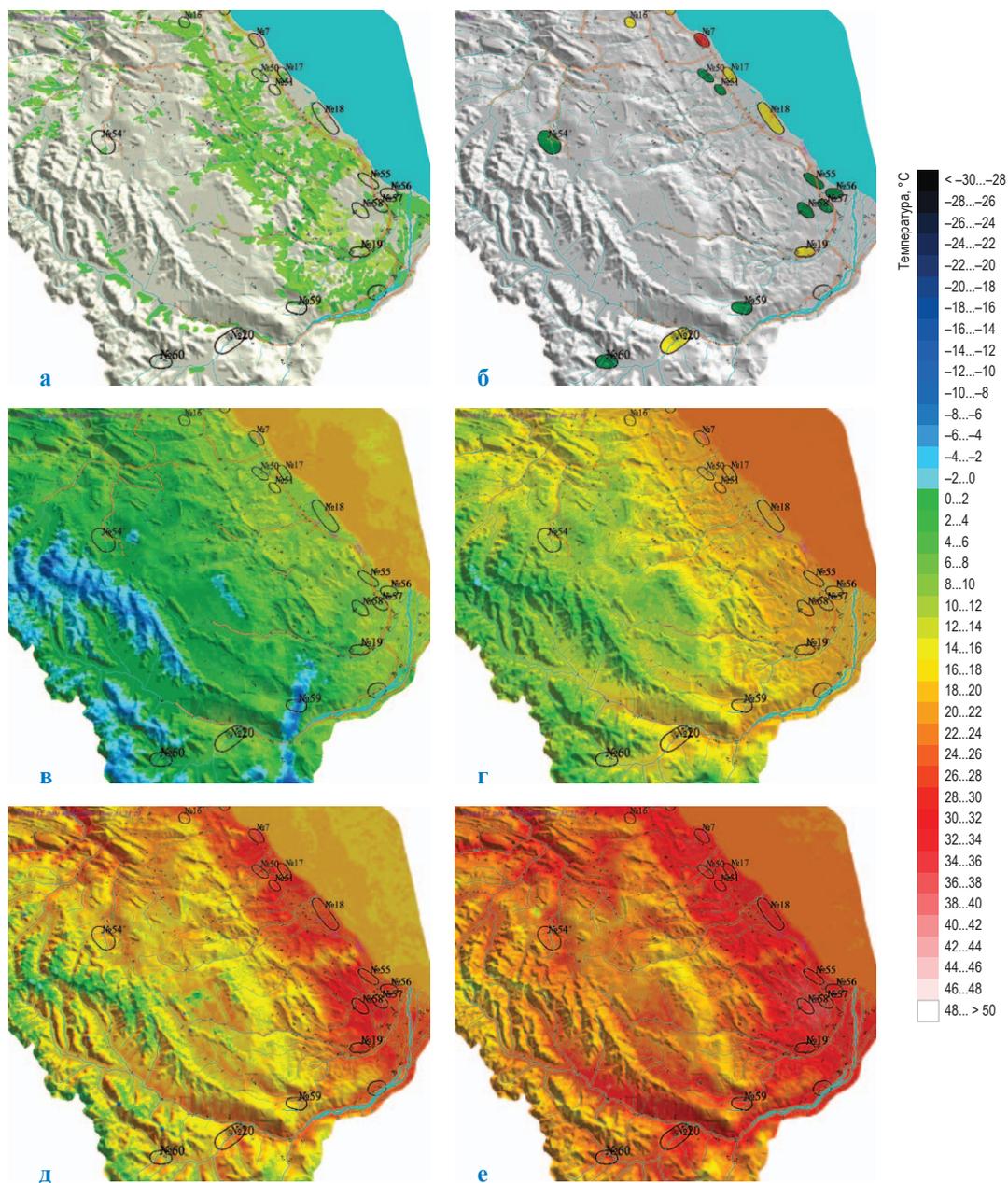


Рис. 11. Результаты интеграции и визуализации данных дистанционного зондирования в 3D-модель южной части Республики Дагестан: а – окраска по растительности; б – окраска по месторождениям и перспективным площадям термальных вод; в – 8 июня 2005 г. ночной снимок; г – 8 июня 2005 г. дневной снимок; д – 17 июля 2005 г. ночной снимок; е – 16 июля 2005 г. дневной снимок

Разработка собственных информационных технологий и систем решает сразу две очень важные задачи: исключает необходимость закупать дорогие лицензионные программные продукты, которые в любом случае приходится

дорабатывать под конкретные прикладные задачи, и дает возможность собственному кадровому потенциалу из числа студентов профильных специальностей использовать свои знания на практике.

Список литературы

- Булаева Н.М. Изучение структуры земной коры Восточного Предкавказья по данным дистанционного ИК-зондирования: дисс. ... канд. физ.-мат. наук / Н.М. Булаева; Институт проблем геотермии ДНЦ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 1992. – 118 с.
- Булаева Н.М. Сопряженный мониторинг теплового поля Земли для исследования геотермальных энергоресурсов Дагестана / Н.М. Булаева // Мониторинг. Наука и технологии. – 2009. – № 1 (1). – С. 27–36.
- Гридин В.И. Системный подход к организации сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов Дагестана / В.И. Гридин, Н.М. Булаева, М.Г. Даниялов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 2 (3). – С. 30–41.
- Булаева Н.М. Система сбора, накопления и интерпретации геофизических данных по Восточному Предкавказью для решения мониторинговых задач / Н.М. Булаева, Р.Ш. Османов // Информационные ресурсы России. – 2004. – № 2. – С. 22–25.
- Булаева Н.М. Информационная система геоэкологического мониторинга Республики Дагестан / Н.М. Булаева, А.Д. Филенко, Б.И. Магомедов и др. // Геоинформатика. – 2007. – № 2. – С. 4–10.
- Булаева Н.М. Комплексный мониторинг закономерностей формирования теплового поля для изучения и локализации перспективных площадей геотермальной энергии / Н.М. Булаева // Сб. ст. Всероссийской конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». – М., 2010. – Т. 1. – С. 162–173.
- Булаева Н.М. Сопряженный мониторинг окружающей среды с использованием новых геоинформационных технологий / Н.М. Булаева, Ш.А. Исмаилов, Б.И. Магомедов и др. // Сб. трудов конференции «Информационные и телекоммуникационные системы: теоретические основы информационных технологий». – Махачкала, 2006. – С. 208–214.
- Булаева Н.М. Использование дистанционных данных для исследования геотермальных энергоресурсов Дагестана / Н.М. Булаева, Р.Ш. Османов // Сб. науч. ст. Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2009. – С. 11–16.
- Булаева Н.М. Трехмерное моделирование и анализ теплового поля Махачкалинского месторождения термальных вод / Н.М. Булаева, К.А. Кудрявцева, Д.Н. Кобзаренко // Физика Земли. – 2004. – № 7. – С. 65–70.
- Гридин В.И. Мониторинг объектов топливно-энергетического комплекса в условиях глобальных изменений окружающей среды / В.И. Гридин, Н.М. Булаева // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 3 (8). – С. 14–24.
- Гридин В.И. Мониторинг запасов углеводородного сырья в условиях глобальных изменений окружающей среды // В.И. Гридин, Н.М. Булаева // Мониторинг. Наука и технологии. – 2011. – № 4 (9). – С. 6–14.
- Булаева Н.М. Система сбора и визуализации сейсмологической информации / Н.М. Булаева, М.Н. Дадашев, Р.Р. Мурсалов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 3. – С. 35–41.
- Булаева Н.М. Система экологического мониторинга углепромышленных регионов / Н.М. Булаева, М.Н. Дадашев, В.С. Пономарев и др. // Экология промышленного производства. – 2015. – № 2. – С. 34–39.

Coupled monitoring of the thermal field of the Earth for studying geothermal energy resources of Dagestan

N.M. Bulayeva^{1*}, M.N. Dadashev², Ye.B. Grigoryev³

¹ LLC Center of the Conjugated Monitoring of Environment and Natural Resources, Bld. 2, Selivantyeva street, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367027, Russian Federation

² National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Bld. 1, Estate 65, Leninskiy prospect, Moscow, 119991, Russian Federation

³ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

* E-mail: bulayeva_nurjagan@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of longstanding experimental and theoretical studies of the temperature field of the Earth’s crust in the Republic of Dagestan including a consolidated digital map of the fields and prospective areas of geothermal resources of Dagestan obtained with use of modern GIS-technologies. The conducted researches

proved expediency of application of remote data for research of geothermal energy resources of Dagestan. The great advantage of the developed technologies is the possibility of interfacing different kinds of data.

It is shown that besides the remote-data map of thermal areas of Dagestan the 3D models and data integration systems can help to combine remote data with the results of geodynamic studies, which will highlight relationship with fault tectonics etc., thereby improving reliability of scientific research and gaining new knowledge about the region. Comparative analysis of the results of the coupled (underground-surface-aerospace) monitoring of geothermal resources, oil and gas reserves in the framework of cosmobiorythmic cycles of different duration will allow converting to 4D simulation of modern geophysical processes.

Keywords: temperature field, crust, aerospace monitoring, oil and gas, GIS-technology, Republic of Dagestan, 3D-model, digital map, information technology, coupled monitoring, tectonics, geothermal resources, geophysical processes.

References

1. BULAYEVA, N.M. The study of the structure of the crust of the Eastern Caucasus according IR remote sensing [Izucheniye struktury zemnoy kory Vostochnogo Predkavkazy po dannym distantsionnogo IK-zondirovaniya]. Candidate thesis (Physics and Mathematics). Institute of Geothermal Problems, Dagestan scientific center of Russian Academy of Sciences. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 1992. (Russ.).
2. BULAYEVA, N.M. Coupled monitoring of the Earth's thermal field aimed at studying geothermal resources of Dagestan [Sopryazhenny monitoring teplovogo polya Zrmla dlya issledovaniya geotermalnykh energoresursov Dagestana]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2009, no. 1(1), pp. 27–36. ISSN 2076-7358. (Russ.).
3. GRIDIN, V.I., N.M. BULAYEVA, M.G. DANIALOV. System approach to organization of associated environmental and resource monitoring in Dagestan [Sistemny podkhod k organizatsii sopryazhennogo monitoringa okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Dagestana]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2010, no. 2(3), pp. 30–41. ISSN 2076-7358. (Russ.).
4. BULAYEVA, N.M., R.Sh. OSMANOV. A system for collection, accumulation and interpretation of geophysical data on Eastern Ciscaucasia aimed at fulfilment of monitoring tasks [Sistema sbora, nakopleniya i interpretatsii geofizicheskikh dannykh po Vostochnomy Predkavkazy dlya resheniya monitoringovykh zadach]. *Informatsionnye Resursy Rossii*. 2004, no. 2, pp. 22–25. ISSN 0204-3653. (Russ.).
5. BULAYEVA, N.M. Informational geoecological monitoring system of the Republic of Dagestan [Informatsionnaya sistema geoekologicheskogo monitoringa Respubliki Dagestan]. *Geoinformatika*. 2007, no. 2, pp. 4–10. ISSN 1609-364X. (Russ.).
6. BULAYEVA, N.M., A.D. FILENKO, B.I. MAGOMEDOV et al. Complex monitoring of patterns in generation of the thermal field in order to study and localize promising areas of geothermal energy [Kompleksny monitoring zakonmernostey formirovaniya teplovogo polya dlya izucheniya i lokalizatsii perspektivnykh ploshhadey geotermalnoy energii]. In: *Collected papers of The All-Russian conference "Renewable power engineering: challenges and outlooks"*. Moscow, 2010, vol. 1, pp. 162–173. (Russ.).
7. BULAYEVA, N.M., Sh.A. ISMAILIOV, B.I. MAGOMEDOV et al. Coupled environmental monitoring with application of new geoinformational technologies [Sopryazhenny monitoring okruzhayushchey sredy s ispolzovaniyem novykh geoinformatsionnykh tekhnologiy]. In: *Collected papers of the conference "Information and telecommunication systems: theoretical fundamentals of information technologies"*. Makhachkala, 2006, pp. 208–214. (Russ.).
8. BULAYEVA, N.M., R.Sh. OSMANOV. Application of remote sensing data for studying geothermal energy resources of Dagestan [Ispolzovaniye distantsionnykh dannykh dlya issledovaniya geotermalnykh energoresursov Dagestana]. In: *Collected papers of the All-Russian conference "Actual problems in remote sensing of the Earth from space"*. Moscow: Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 11–16. (Russ.).
9. BULAYEVA, N.M., K.A. KUDRYAVTSEVA, D.N. KOBZARENKO. 3D simulation and analysis of the thermal field of Makhachkala deposit of thermal waters [Trehmernoye modelirovaniye i analiz teplovogo polya Makhachkalinskogo mestorozhdeniya termalnykh vod]. *Fizika Zemli*. 2004, no. 7, pp. 65–70. ISSN 0002-3337. (Russ.).
10. GRIDIN, V.I., N.M. BULAYEVA. Monitoring objects of the Fuel & Energy Complex in conditions of global environmental changes [Monitoring obyektov toplivno-energeticheskogo kompleksa v usloviyakh globalnykh izmeneniy okruzhayushchey sredy]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2010, no. 3(8), pp. 14–24. ISSN 2076-7358. (Russ.).
11. GRIDIN, V.I., N.M. BULAYEVA. Monitoring reserves of raw hydrocarbons in conditions of global environmental changes [Monitoring zapasov uglevodorodnogo syrva v usloviyakh globalnykh izmeneniy okruzhayushchey sredy]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2011, no. 4(9), pp. 6–14. ISSN 2076-7358. (Russ.).
12. BULAYEVA, N.M., M.N. DADASHEV, R.R. MURSALOV. A system for collection and visualization of seismic data [Sistema sbora i vizualizatsii seysmologicheskoy informatsii]. *Problemy Bezopasnosti i Chrezvychaynykh Situatsiy*. 2015, no. 3, pp. 35–41. ISSN 0869-4176. (Russ.).
13. BULAYEVA, N.M., M.N. DADASHEV, V.S. PONOMAREV et al. A system for ecological monitoring of coal-mining regions [Sistema uglepromyshlennogo ekologicheskogo monitoringa uglepromyshlennykh regionov]. *Ekologiya Promyshlennogo Proizvodstva*. 2015, no. 2, pp. 34–39. ISSN 2073-2589. (Russ.).