

К. М. Каримов, Л. К. Каримова, К. Р. Гатауллин



Тепловизионная томография геологической среды



Казань, 2015

К. М. Каримов, Л. К. Каримова, К. Р. Гатауллин

Тепловизионная томография геологической среды

Казань, 2015

УДК 550.836+528(536)

ББК 26.82

K23

Каримов К.М., Каримова Л.К., Гатауллин К.Р.
Тепловизионная томография геологической среды.
Казань, 2015. – 290 с.: ил. 127

ISBN 978-5-9690-0264-7

В монографии рассматриваются теоретические, методические и прикладные аспекты космической, авиационной и наземной спектроскопической тепловизионной съемки Земли. Представлена методика тепловизионного зондирования геологической среды на основе пространственной фильтрации поля. Систематизированы результаты зондирования Земли на основе изучения эндогенного теплового поля. Оценена эффективность метода тепловизионной томографии при поисках углеводородов, выявлении залежей подземных вод, решении техногенных и экологических задач.

Книга представляет интерес для геологов и геофизиков, аспирантов и студентов геологических специальностей в виде научного и учебного пособия.

Рецензент д-р геол.-мин. наук, профессор А. С. Борисов

Karimov K.M., Karimova L.K., Gataullin K.R.
Thermovision tomography of geological environment

This study considers theory, techniques, and applications of space, aerial, and ground multispectral thermovision imaging of the Earth. A technique of thermovision probing of geological environment based on spatial filtration of the field is described. The results of probing the Earth based on the study of its endogenous thermal field are systematized. An efficiency estimate is provided for the use of Thermovision Tomography in search of hydrocarbons, deposits of ground waters, accomplishing different technological and ecological tasks.

The book can be of interest as a textbook and scientific aid for geologists and geophysicists, postgraduate and graduate students of geological professions.

ISBN 978-5-9690-0264-7

© Коллектив авторов, 2015

© Издательство АН РТ, 2015

Оглавление

1.	Основы дистанционной тепловизионной съемки Земли	
1.1.	Физические принципы космической спектрозональной съемки	13
1.2.	Космические спектрозональные снимки – основа построения модели геологической среды	22
2.	Методика спектрозонального тепловизионного зондирования геологической среды	
2.1.	Основы решения обратной задачи пассивной тепловизионной томографии геологической среды	29
2.2.	Моделирование геологической среды на основе пространственной фильтрации поля	35
2.3.	Формирование региональной составляющей теплового потока	50
2.4.	Формирование локальной составляющей теплового поля	54
2.5.	Расчет локальных тепловых источников на основе непрерывного вейвлет преобразования снимка	56
2.6.	Исследование динамики природной среды	62
2.7.	Программный комплекс и тестирование на синтетических моделях	73
2.8.	Электронный паспорт геофизического объекта	86
3.	Тепловизионная томография при поисках залежей углеводородов	
3.1.	Графические образы структур земной коры	88
3.2.	Развитие тепловой зоны вокруг флюидных систем	101
3.3.	Способ выявления залежей углеводородов	106
3.4.	Поиск залежей нефти в терригенном осадочном комплексе Южно-Татарского свода	128
3.5.	Формирование залежей углеводородов в Гвинейском заливе	130
3.6.	Оценка перспектив бурения скважин на шельфе моря	141
4.	Тепловизионная томография в изучении подземных вод	
4.1.	Методический способ обработки космических снимков	148
4.2.	Проявление зон субмаринной разгрузки подземных вод	153
4.3.	Выявление зон морской интрузии в береговой зоне	161

5.	Тепловизионная томография импактных кратеров	
5.1.	Строение кратеров по данным тепловизионного зондирования	167
5.2.	Объемный метод подсчета запасов воды и углеводов	182
5.3.	Геофизическая характеристика импактного кратера Chicxulub	184
5.4.	Особенности строения импактного кратера Siljan Ring	186
5.5.	Исследование импактного кратера Madona	194
6.	Тепловизионное зондирование при тектоническом районировании литосферы	
6.1.	Региональная тепловая зональность в условиях металлургической специализации	200
6.2.	Мелкомасштабное прогнозное исследование месторождений золото-алмазоносной провинции	218
7.	Тепловизионная авиационная съемка природных и техногенных систем	
7.1.	Авиационный тепловизионный комплекс	230
7.2.	Технический регламент авиационной съемки	234
7.3.	Диагностика среды и состояние нефтепровода	240
7.4.	Исследование экологического состояния природной среды вблизи магистрального нефтепровода «Грозный – Баку»	245
7.5.	Оценка экологического загрязнения в акватории Финского залива города Санкт-Петербурга	250
7.6.	Оценка экологического риска зоны отдыха «Винновская роща» города Ульяновска	252
7.7.	Мониторинг теплового поля Ашальчинского месторождения природных битумов Южно-Татарского свода	259
8.	Тепловизионная диагностика горного массива при строительстве тоннеля	
8.1.	Методика тепловизионного зондирования горного массива	264
8.2.	Тестирование метода при строительстве транспортного тоннеля	269
	Послесловие	274
	Список литературы	277

Table of contents

1.	The basics of remote thermovision imaging of the Earth.	
1.1.	The physical principles of space multispectral imaging.	13
1.2.	Space multispectral images as the basis for building models of geological environments.	22
2.	The technique of multispectral thermovision sounding of geological environment.	
2.1.	The foundations of solving the inverse problem of passive thermovision tomography of geological environment.	29
2.2.	Geological environment modeling based on spatial filtration of field.	35
2.3.	Formation of the regional component of thermal flow.	50
2.4.	Formation of the local component of thermal field.	54
2.5.	Calculation of local heat sources based on continuous wavelet transformation of the image.	56
2.6.	Study of natural environment dynamics.	62
2.7.	Software complex and testing on synthetic models.	73
2.8.	Electronic passport of a geophysical object.	86
3.	The use of thermovision tomography in search of hydrocarbon deposits.	
3.1.	Graphic images of the Earth's crust structures.	88
3.2.	Development of the thermal area around fluid systems.	101
3.3.	Hydrocarbon deposits searching technique.	106
3.4.	Search for oil deposits in the terrigenous sedimentary complex of the South-Tatar uplift.	128
3.5.	Formation of hydrocarbon deposits in the Gulf of Guinea.	130
3.6.	Estimate of perspectives of well boring in the sea shelf.	141
4.	Thermovision tomography in the studies of ground waters.	
4.1.	Space image processing method.	148
4.2.	Occurrence of submarine ground water relief zones.	153
4.3.	Revealing of sea intrusions in the coastal zone.	161

5.	Thermovision tomography of impact craters.	
5.1.	Crater structure based on thermovision tomography data.	167
5.2.	Volumetric method for calculation of deposits of water and hydrocarbons.	182
5.3.	Geophysical characteristics of the Chicxulub impact crater.	184
5.4.	Structure features of the Siljan Ring impact crater.	186
5.5.	Study of the Madona impact crater.	194
6.	Thermovision sounding in tectonic zoning of lithosphere.	
6.1.	Regional thermal zoning under conditions of metallogenic specialization.	200
6.2.	Small-scale prospective research of deposits in a gold-diamond-bearing province.	218
7.	Thermovision aerial imaging of natural and technological systems.	
7.1.	Aerial thermovision complex.	230
7.2.	Technical conditions of aerial imaging.	234
7.3.	Diagnostics of environment and condition of an oil pipeline.	240
7.4.	Study of ecological conditions of the natural environment near the trunk line „Grozny – Baku.”	245
7.5.	Estimate of ecological pollution in the water area of the Gulf of Finland near Saint Petersburg.	250
7.6.	Environmental risks estimate of the “Vinnovskaya Roshcha” recreation area in Ulyanovsk.	252
7.7.	Thermal field monitoring of the Ashalchinsk natural bitumen deposit in the South-Tatar uplift.	259
8.	Thermovision diagnostics of a mountain range for building a tunnel.	
8.1.	Thermovision probing technique of a mountain range.	264
8.2.	Testing the technique when building a vehicle traffic tunnel.	269
	Afterword	274
	Citation	277



Во имя Аллаха,
Милостивого, Милосердного.

Книгу посвящаю отцу Мидхату Ганиевичу

Предисловие

В современной геофизике одним из наиболее перспективных, инновационных направлений является изучение физического состояния неоднородных геологических сред и их геометрического строения при помощи космических, авиационных и наземных спектрональных снимков. Методология исследований основывается на компьютерной обработке информации, поступающей от эндогенного теплового потока, процессах вычисления и статистического анализа материалов. Геодинамическое моделирование среды предлагается осуществлять методом объемной тепловизионной томографии (3D-TBT) – в качестве альтернативы существующим методикам моделирования среды. Применение этой технологии позволяет значительно расширить спектр решаемых прикладных задач: поиск залежей нефти и газа на суше и шельфе; разведка месторождений полезных ископаемых; экологический мониторинг природно-техногенных систем; поиск подземных минеральных вод и гидротермальных источников тепла; диагностика состояния техногенных объектов; мониторинг природных явлений и чрезвычайных ситуаций. Эффективность данного метода при проведении тектонического и металлогенического районирования литосферы доказана многочисленными экспериментами, проведенными в различных точках планеты. При подготовке научного издания авторы опирались не только на теоретические знания и практический опыт в геофизике, но и на собственную веруубежденность и использование сведений из сур Корана.

Именем Аллаха , милость Которого вечна и безгранична! Воистину, это (Коран) – Ниспослание от Господа миров (Сура «Аш-Шуара», 26:192). Вопросы веры и создания миров раскрываются в свете толкования аятов Священного Писания. Многие факты сотворения Вселенной и всего сущего между небесами и землей были изложены человечеству в ниспосланном Коране уже четырнадцать столетий тому назад. Всевышний Творец передал человечеству знания, указал на многие научные феномены, осознать и найти применение некоторым из которых люди смогли лишь в ходе новейших научных открытий.

Аллах увеличивает или ограничивает удел тому из Своих рабов, кому пожелает. Воистину, Аллах знает о всякой вещи. (Сура «Аль-Анкабут», 29:62). Полагаясь на Божественное предопределение, искренне веруем, что Он помог открыть нам истину научной идеи, ведя нас праведным путем. Просим Аллаха Субханаха ва Тагаля Всезнающего, Всемогущего, чтобы эта книга оказалась полезной геологам и геофизикам и дала возможность им найти ответы на многие актуальные вопросы.

Начиная повествование научного издания, напомним читателю аят из Священного Корана: — **Хвала Аллаху, который сотворил небеса и землю и установил мраки и свет...** (Сура «Аль-Анам», 6:1). Как известно, человеческий глаз способен воспринимать только часть световой энергии – «**видимый свет**». Другие виды энергии в оптическом диапазоне длин волн, в частности, радиоволны, ультрафиолетовое и инфракрасное излучения регистрируются только при помощи специальной аппаратуры. В этой связи примечательно, что в аяте слово «**мрак**», воспринимаемый нами как «темнота», использовано во множественном числе – «**мраки**». Установлено, что волны разной длины образуют очень широкий спектр и содержат неизвестную информацию. Благодаря современным техническим средствам и методам измерения энергии электромагнитного излучения в различных диапазонах волн, с помощью математических подходов к обработке и интерпретации данных, космическая геология стала развиваться в самых различных направлениях. Упомянутый факт служит, таким образом, одним из свидетельств истинности слов Священного Корана, которые убедительно подтверждаются открытиями современной геофизики.

Прямой путь изучения строения Земли. Эта книга раскрывает особенности космической, авиационной и наземной спектрозональных тепловизионных съемок применительно к самым актуальным геофизическим задачам по изучению Земли. В издании представлены прогрессивные методы дешифрирования снимков, позволяющие интерпретировать данные с высокой точностью. Мы сосредоточили свои усилия на изучении лишь небольшой области геофизики, в частности, на развитии единой методологии обработки и представления данных в виде тепловых моделей строения геологической среды. Данный формат в дальнейшем используется для интерпретации результатов наряду с наземными геофизическими методами. Метод дистанционного тепловизионного зондирования (ДТЗ) Земли, в рамках которого применим томографический подход к изучению эндогенного теплового поля (ТП), позволяет создавать новые и совершенствовать существующие технологии разведки полезных ископаемых. Используя метод пассивной (*эмиссионной*) тепловизионной томографии (ТВТ) внутренней структуры и физического состояния объекта, мы увеличиваем детализацию на всех уровнях геологического разреза при прогнозировании локальных объектов осадочного чехла, с которыми связаны залежи углеводородов (УВ), подземных вод, рудных и нерудных полезных ископаемых. Таким образом, этот оперативный и достоверный метод получения геологической информации способствует дальнейшему развитию науки о Земле.

В разделах книги кратко изложены физические принципы космической спектрозональной съемки Земли, показано, что снимки являются непосредственной основой построения модели геологической среды. В издании раскрыты принципы пассивной тепловизионной томографии, изложены физико-математические основы и технология построения моделей тепловых неоднородностей литосферы в классе локальных источников переменной тепловой энергии (излучения). Нами предложено воспользоваться алгоритмами решения обратной краевой задачи расчета теплового поля и программным вычислительным комплексом, что позволяет повысить информативность ДТЗ Земли:

- решение обратной задачи граничного типа для теплового поля с геометрическим центром плотности тепловой энергии источника и/или в виде свертки краевых условий с ядром Гаусса;

- расчет модели распределения локального поля путем двумерного вейвлет-преобразования на основе метода функции источника, с последующим пересчетом поля в физические значения ($\text{Вт}/\text{м}^2$) теплового потока земной коры (ЗК);
- расчет объемной модели блоково-разломных структур осадочного чехла и кристаллического фундамента, а также их однородности;
- извлечение геохимической информации в результате комплексного анализа спектральных параметров растительности и почвы в привязке к глубинному строению геологической среды в пространственной и временной динамике.

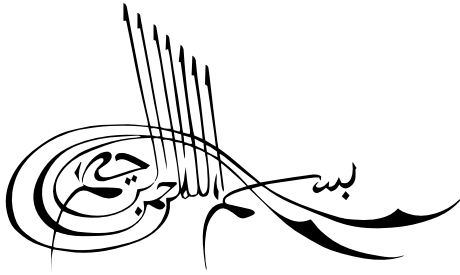
В работе предложен теоретически и экспериментально обоснованный способ выявления залежей углеводородов в коллекторах осадочного чехла по спектрально-зонным снимкам (*патент России на изобретение*). Инновационная технология основана на информации о структуре эндогенного потока теплового излучения с классификацией региональных и локальных неоднородностей по форме. Рассмотрена методика картирования зон разуплотнения пород с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, а также способы выявления геодинамических активных зон разломов, областей сжатия, растяжения и разуплотнения пород, в состав которых входят зоны перетоков и накоплений флюидов, потенциально относящиеся к природным резервуарам УВ. Предложенный метод является фундаментальной основой для оптимизации процесса нефтепоисковых работ. Он может найти практическое применение на различных этапах региональных, поисковых и разведочных работ, способен сократить сроки геологоразведочных работ и увеличить достоверность прогнозирования ловушек углеводородов.

Разработан и подтвержден на практике способ выявления залежей подземных вод (*патент России на изобретение*), повышающий эффективность тепловизионной томографии геологической среды. В основе способа положено изучение систем природных каналов миграции к поверхности флюидов, образующих в проницаемых слоях участки перетоков и в пористых средах накопления вод в форме многоэтажных камер. Способ впервые нашел применение в исследованиях процессов формирования зон субмаринных источников пресных вод и интрузии морской воды, поиска глубинных резервуаров в импактных кратерах.

Новые данные о строении тектоносферы позволили скорректировать предыдущие представления об изменении теплового поля в зависимости от глубины. Опираясь на современную тектоническую концепцию формирования Земли и принципе актуализма, созданы физико-геологические модели, отражающие тепловую делимость литосферы на разных уровнях, установлены связи между слаборасчлененной верхней мантией и структурами земной коры, а также их металлогеническая специализация. Обосновано применение 3D-TBT в мелкомасштабных прогнозных исследованиях рудных и нерудных полезных ископаемых.

Раскрывается методика тепловизионной авиационной съемки природных и техногенных систем, а также способ наземной тепловой диагностики опасных участков горного массива при строительстве тоннеля (*патенты России на изобретение*). Доказано на практике применение в реальных геологических средах метода 3D-TBT, повышающего достоверность и результативность экологических изысканий.

Путеводитель по литературе (список не претендует на полноту). С важнейшими понятиями теории и методики космической спектральной съемки можно познакомиться в книге [49]. Монографии [20, 82] дают представление о теории цифровой обработки изображений. Полезные советы по основам термодинамики содержатся в учебниках [6, 55], с основными уравнениями математической физики можно ознакомиться в [95], а по теории и применению вейвлетов – в [25, 103, 108]. При изучении томографического подхода в геофизике рекомендуем обратиться к обзору [94, 97]. Перечень большинства использованных определений по тектонике и геодинамике приводится в справочнике [92]. В статьях [34–40] изложены описания алгоритмов тепловизионной томографии природных образований.



In the name of Allah,
Gracious and Merciful.

*I devote this book to my father,
Midhat Ganievich*

Introduction

One of the most promising and innovational directions in modern geophysics is study of physical state of heterogeneous geological environments and their geometrical composition with the help of space, aerial, and ground multispectral images. The methods of such studies are based on computer processing of information obtained from the endogenous heat flux, calculations and statistical analysis of those materials. It is suggested to perform geodynamic modeling of the environment by means of 3D thermovision tomography (3D-TVT), as an alternative to the currently used techniques of environment modeling. This technology allows to greatly increase the range of possible applications: search for oil and gas deposits onshore and on the shelf; prospecting of mineral deposits; ecological monitoring of natural and technological systems; search for ground mineral waters and hydrothermal heat sources; diagnostics of the state of technological objects; monitoring of natural phenomena and emergencies. The efficiency of this method for tectonic and metallogenic lithosphere zoning is proven by numerous experiments that were held in different places around the globe. While working on this scientific study, the authors relied not only on theoretical knowledge and practical experience in geophysics, but also on their convictions of faith and information provided in surahs of the Qur'an.

In the name of Allah, Whose mercy is eternal and boundless! Indeed, the Qur'an is the revelation of the Lord of the worlds. (Surah Ash-Shu'ara 26:192).

The subjects of faith and creation of the worlds are unveiled in the light of interpretation of ayats of the Holy Scripture. Numerous facts of creation of the Universe and everything that exists between the skies and the Earth were described for humanity in the revealed Qur'an as far as fourteen centuries back. The Most High Creator has given humanity knowledge, and pointed out a number of scientific phenomena, some of which could be understood and applied only with the latest scientific discoveries.

Allah extends provision for whom He wills of His servants and restricts for him. Indeed Allah is, of all things, Knowing. (Surah Al-'Ankabut, 29:62). Based on the sense of these words and our contemplation, we sincerely believe that He helped us to unveil the truth of scientific idea by leading us the right way. We ask the Most High Allah for this book to be useful for geologists and geophysicists, and help them find answers to many important questions.

In the beginning of this scientific publication, let us remind the reader an ayat from the Holy Quran: – **[All] praise is [due] to Allah, who created the heavens and the earth and made the darknesses and the light...** (Surah Al-An'am 6:1). As it is well known, the human eye is able to perceive only a part of the light energy – the so-called visible light. Other kinds of energy of wavelengths of the optic range, in particular, radio waves, ultraviolet and infrared radiation, can be registered only with the help of special equipment. In this regard it is noteworthy that the word translated as „darkness” in this ayat is in fact used in plural in the original – «darknesses». It was discovered that waves of different lengths make a wide spectrum and contain unknown information. Thanks to the modern technical tools and techniques for measurement of electromagnetic radiation in different wavelengths, with the help of mathematical approaches to data processing and interpretation, space geology started to develop in a number of various directions. This testifies to the truth of the words provided in the Holy Qur'an, which are successfully proven by modern discoveries in geophysics.

This is a direct path to studying the Earth's structure. This book describes features of space, aerial, and ground multispectral thermovision imaging applied to the most pressing tasks of studying the Earth. The study presents progressive image deciphering methods that enable highly accurate data interpretation. We concentrated our efforts on studies of a small section

of geophysics, namely, development of a single methodology of data interpretation and representation as thermal models of composition of geological environment. This format is further used for interpretation of results together with ground geophysical methods. The method of remote thermovision probing (RTP) of the Earth, within which the tomographic approach to studying endogenous thermal field (TF) can be applied, enables creation of new technologies of mineral prospecting and improving the existing ones. The use of the passive (emission) thermovision tomography (TVT) method for study of the internal structure and physical state of the object enables increased refinement on every level of geological section when making predictions of local objects of the sedimentary cover associated with deposits of hydrocarbons, ground waters, ore and non-metallic mineral resources. Therefore this operative and reliable method of obtaining geological information contributes to further development of Earth-related science.

The chapters of this book briefly describe principles of space multispectral imaging of the Earth; it is shown that the images constitute the direct basis for modeling the geological environment. The study explains the principles of passive thermovision tomography, describes physical and mathematical foundations and technology for building models of thermal heterogeneities of lithosphere in the class of local sources of transient thermal energy (emission). We suggest the use of the algorithms for solving the inverse boundary problem of calculation of the thermal field together with software calculation complex, which enables to increase the information value of remote thermovision probing of the Earth:

- solution of the inverse problem of boundary type for the thermal field with geometric density center of the thermal energy of the source and/or as a fold of boundary conditions with Gauss kernel;
- calculation of local field distribution model of the local field based on two-dimensional wavelet transformation based on the method of the source function, with further recalculation of the field into physical values (W/m^2) of the thermal flow of the Earth's crust;
- calculation of 3D models of block-fault structures of the sedimentary cover and crystalline base, as well as their homogeneity;

- extraction of geochemical information as a result of complex analysis of spectral parameters of vegetation and soil in connection with deep structure of the geological environment in spatial and temporal dynamics.

In this study we suggest the theoretically and experimentally substantiated technique for finding hydrocarbon deposits in collectors of the sedimentary cover via multispectral images (patented in Russia). This innovative technology is based upon information on the structure of the endogenous flow of thermal radiation with classification of regional and local non-homogeneities by the form. We consider a mapping method for zones of rock decompression with improved reservoir properties, as well as ways for discovering geodynamic active fault zones, zones of rock compression, stretching, and rock decompression areas of formations containing zones of fluid crossflow and accumulation, which can potentially be natural hydrocarbon reservoirs. The suggested method is the fundamental basis for optimization of the process of oil prospecting works. It can be applied in practice on different stages of regional, prospecting, and exploration works, can decrease the time required for geological exploration and increase reliability of predicting hydrocarbon traps.

A technique for discovering deposits of ground waters (invention patented in Russia) that increases efficiency of thermovision tomography of the geological environment is developed and proven by practice. The technique is based on studying systems of natural fluid migration channels to the surface, which form plots of crossflows in permeable layers and multistoried water accumulation cameras in porous mediums. For the first time this technique was used for study of the formation process of zones of submarine fresh water supplies and intrusions of seawater, and search for deep reservoirs in impact craters.

The new data on the structure of tectonosphere allowed to update the previous views on the changes of thermal field depending on depth. Based on the modern tectonic concept of formation of the Earth and the actualism principle, new physical and geological models are created, reflecting thermal divisibility of lithosphere on different levels; connections are made between poorly broken upper mantle and the structures of the Earth's crust, as well as their metallogenic specialization. The use of 3D-TVT in small-scale predictive studies of ore and non-metalliferous minerals is substantiated.

The technique of thermovision aerial imaging of natural and technical systems is explained, as well as the technique of on-ground thermal diagnostics of dangerous areas of mountain ranges (inventions patented in Russia). Practical proofs are provided for the use of 3D-TVT method in real geological environments to increase reliability and efficiency of ecological studies.

Literature overview (with no claim to be complete). The most important concepts of theory and principles of space multispectral imaging can be found in the book [49]. The studies [20, 82] provide introduction to the theory of digital image processing. Useful advice on the basics of thermodynamics can be found in the textbooks [6, 55], the main concepts of mathematical physics are provided in [95], and the theory and application of wavelets – in [25, 103, 108]. When learning the tomographic approach in geophysics, we recommend the review [94, 97]. The list of the majority of definitions on tectonics and geodynamics used herein can be found in the reference book [92]. The articles [34–40] describe algorithms of thermovision tomography of natural formations.



«...Он подчинил вам то, что на небесах, и то, что на земле. Воистину, в этом – знамения для людей размышляющих.» (Сура «Аль-Джасийа», 45:13)

وسخار لكم ما فوق السَّمٰوٰتِ
وما فوق اَرْضِ جَمِيْعًا مِنْ اَنْ
فَوْقَ ذٰلِكَ اٰيٰتٌ اَقْوَمُ يَتَذَكَّرُوْنَ

1.1. Физические принципы космической спектрозональной съемки

В работе рассматривается геологическая среда как гетерогенная нестационарная термодинамическая система, объекты которой способны обмениваться с другими телами энергией и веществом. С окружающей средой термодинамическая система может энергетически взаимодействовать посредством передачи теплоты и производства работы [6,15]. Тепло является наиболее универсальной формой энергии, возникающей в результате молекулярно-кинетического движения микрочастиц – молекул, атомов, электронов. Явления и процессы, происходящие в результате взаимного воздействия объектов, протекают в пространстве и времени. В основу принципа построения термодинамики положены три экспериментальных закона [6,47]: *первое* начало термодинамики – закон сохранения и превращения энергии; *второе* начало термодинамики указывает направление, по которому протекают естественные явления в природе (*закон об энтропии*); *третье* начало термодинамики утверждает, что абсолютный нуль температуры недостижим.

Теория теплообмена изучает процессы распространения теплоты в телах твердых, жидких и газообразных. Теплота может передаваться в горных породах тремя способами: молекулярной теплопроводностью

(кондукция); перемешиванием (конвекция); излучением (радиация) [55]. Кондукция и конвекция без участия электромагнитного излучения немыслимы, так как на атомном уровне в связи с изменениями тепловой энергии вещества передача ее осуществляется порциями волн. При этом земные недра рассматриваются нами как полупрозрачные. Процесс передачи теплоты (*теплопроводность*) происходит при непосредственном контакте тел с различными температурами и представляет собой перенос теплоты структурными микрочастицами вещества в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры. Конвекционный теплообмен – перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретой жидкости или газа, который зависит прямо пропорционально от скорости движения жидкости или газа.

Передача теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн называется излучением (*радиацией*) [6]. Этот процесс происходит в три стадии: 1) превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию электромагнитных волн; 2) распространение электромагнитных волн в пространстве; 3) поглощение энергии излучения другим телом. При падении на другие тела энергия излучения частично поглощается ими, частично отражается и частично проходит сквозь тело. Процесс превращения энергии излучения во внутреннюю энергию поглощающего тела называется поглощением, который распространяется в пространстве непрерывно в виде электромагнитных волн.

Тепловой поток определяется не только природой и мощностью источника тепла, но и механизмом переноса. Часто все способы переноса теплоты осуществляются совместно. Совокупность всех трех видов теплообмена называется сложным теплообменом. Независимо от механизма переноса тепловой поток всегда направлен от более нагретого к менее нагретому телу, а сам процесс теплообмена, согласно второму закону термодинамики, является необратимым. Теплообмен между телами зависит от их формы и размеров, а также от времени процесса. Другими важными факторами являются физические свойства тел и их агрегатное состояние.

Основным параметром термического изучения геологической среды является теплопроводность, характеризующая способность сред и

горных пород передавать тепло. Теплопроводность пород зависит от минерального состава, структуры, плотности, влажности, температуры. Плотность, пористость и давление, под которым находятся горные породы, связаны между собой. При повышении плотности и давления теплопроводность пород возрастает. Магматические и метаморфические породы обладают коэффициентом теплопроводности 0,2–0,4 Вт/(м·град), осадочные – 0,03–0,5 Вт/(м·град), нефтегазонасыщенные – меньше 0,05 Вт/(м·град). Теплоемкость горных пород определяется их способностью поглощать тепловую энергию. Она отличается сравнительным постоянством и возрастает с увеличением насыщенности тел водой [53].

В геологических средах эффективность лучистого переноса определяется прозрачностью силикатных минералов по отношению к инфракрасным лучам. Большинство твердых и жидких тел излучают энергию всех длин волн, то есть имеют сплошной спектр излучения. Поток излучения, соответствующий всему спектру, называется интегральным лучистым потоком (Вт/м²), испускаемым с единицы поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства (рис.1.1).

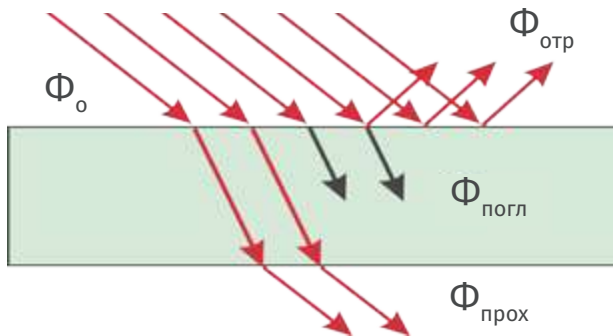


Рис. 1.1. Распределение потока излучения, падающего на полупрозрачную пластину

Если на тело падает поток излучения Φ_0 , то часть потока ($\Phi_{отр} < \Phi_0$) отражается от поверхности тела [6,55]. При не слишком большой толщине слоя часть падающего излучения пройдет насквозь, и за телом будет наблюдаться поток излучения ($\Phi_{прох} < \Phi_0$). Наконец, часть потока, проникающего в тело, будет поглощаться и превращаться в другие формы энергии,

в конечном счете – в тепло. Используя закон сохранения энергии, можно записать $\Phi_0 = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{прох}}$, где $R = \Phi_{\text{отр}}/\Phi_0$ – коэффициент отражения, $A = \Phi_{\text{погл}}/\Phi_0$ – коэффициент поглощения, $D = \Phi_{\text{прох}}/\Phi_0$ – коэффициент пропускания излучения.

Тело, которое абсолютно не поглощает падающее излучение и полностью отражает лучи ($A=0, D=0, R=1$), называется абсолютно белым телом. Тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение ($A=1, R=0$), называется абсолютно черным телом. В природе абсолютно черных, белых и прозрачных тел не существует. Тело, поглощающая способность которого меньше единицы ($0 < A < 1$), но одинакова для всех длин волн, называется серым телом. К таковым относится большинство реальных геологических тел.

Исходные характеристики поля излучения – интенсивность и направление. Общая энергия, излучаемая телом, включает собственное излучение E и отраженное излучение E_R , а их сумма носит название эффективного излучения $E_{\text{эф}}$ (рис.1.2).

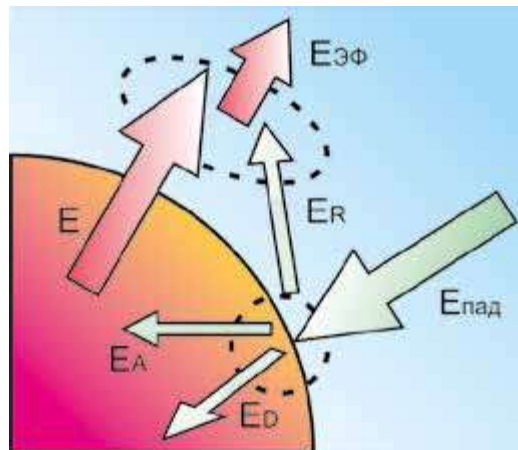


Рис. 1.2. Классификация плотности потока излучения на поверхности тела [55]

В этом случае $E_{\text{эф}} = E + E_R = E + (1-A) E_{\text{пад}} = E + (1-A) E_A/A$, где $E_{\text{пад}}$ – излучение, падающее на поверхность тела; E_A – поглощаемый лучистый поток; E_D – лучистый поток, проходящий сквозь тело.

Тепловое излучение, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (то есть за счет его внутренней энергии) и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Оно характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются как короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, так и длинноволновые (инфракрасные), при низких – преимущественно длинные волны (инфракрасные).

Фундаментальным соотношением в термодинамике является формула М. Планка [11,27], по которой спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела равна:

$$W_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})],$$

где c – скорость распространения электромагнитных волн (скорость света $3 \cdot 10^8$ м/с), h – постоянная Планка [$6,6256 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²], k – постоянная Больцмана [$1,38054 \cdot 10^{-23}$ (Вт·с)/К]. Количественно эффективность излучения описывается спектральной излучательной способностью $\epsilon(\lambda)$.

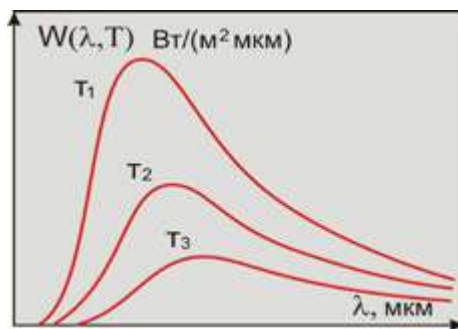


Рис. 1.3. Экспериментальные зависимости интенсивности потока излучения абсолютно черного тела от длины волны и температуры ($T_1 > T_2 > T_3$)

Исследования показывают, что с повышением температуры общая энергия излучения возрастает, а максимум спектра излучения абсолютно черного тела смещается в область меньших длин волн (рис.1.3). Зависимость описывается законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \text{ [мкм]},$$

где λ_{\max} – длина волны, на которую приходится максимум энергии λ излучения.

Суммарная энергия, излучаемая реальным физическим телом с площадью поверхности S за время t при температуре T , будет равна:

$$W(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S \cdot t.$$

Константа этого уравнения называется постоянной Стефана – Больцмана:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Большая часть энергии излучения, испускаемого объектами при земных температурах, приходится на диапазон 3–14 мкм. Так, при температуре земной поверхности 223К максимум излучения приходится на 13 мкм, а при 323К – на 9 мкм. В то же время температура поверхности Солнца составляет порядка 5800К, а максимум излучения приходится на длину волны 0,48 мкм (*желтый цвет*). Таким образом, тепловое излучение Земли в диапазоне длин волн 3–14 мкм превосходит излучение Солнца [42]. Соответственно этим и определяется эффективность тепловизионного зондирования Земли космической съемки.

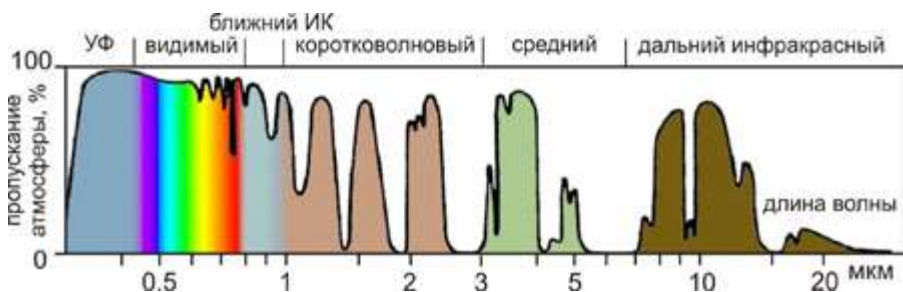


Рис. 1.4. Окна прозрачности земной атмосферы

Другим преимуществом использования диапазона 3–14 мкм является то, что в нем находятся *окна прозрачности* атмосферы, которые позво-

ляют обнаруживать оптические сигналы на сравнительно больших расстояниях (*высота орбиты КА 705 км*). Например, в инфракрасном спектре сканера Landsat-ETM+ имеется ряд *окон прозрачности* в диапазоне волн 0,95–1,05; 1,2–1,3; 1,5–1,8; 2,1–2,4; 3,3–4,2; 4,5–5,1; 8–14 мкм (рис.1.4).

Природные объекты, расположенные на земной поверхности, в оптическом диапазоне длин волн характеризуются спектрами не только теплового, но и отраженного излучения различной интенсивности [49]. Большое многообразие видов и состояний растений, почв и горных пород является причиной того, что их полноценное исследование невозможно на основе измерения излучения в какой-либо одной спектральной зоне. Поэтому оптико-электронная аппаратура дистанционного метода предусматривает одновременную регистрацию изображения ландшафтно-растительных систем в различных участках спектра оптического излучения [24].

Аномалии на полученных снимках формируются за счет тепловых потоков из недр Земли и отражения солнечной энергии. Самое большое количество экзогенной энергии Земля получает от Солнца, но значительная ее часть излучается обратно в пространство. Лишь малая доля солнечной энергии проникает в глубину, измеряемую метрами. Солнечная радиация зависит от времени суток и от времени года. В конце ночи падающее излучение практически отсутствует, и плотность результирующего излучения целиком определяется собственным излучением, направленным перпендикулярно от поверхности в атмосферу. Поэтому знак величины ночного результирующего излучения противоположен дневному вектору.

Суточный баланс тепла у поверхности летом положительный. Летом происходит сложение суточных приращений температур поверхности (точнее – приращение средних температур в слое сезонных изменений температур мощностью в десятки метров). Зимой происходит изымание энергии из поверхностного слоя, тем большее, чем длительнее период температур, более низких, чем среднегодовые.

В слоях, расположенных близко к дневной поверхности континентов, все периодические изменения температуры убывают с глубиной по экспоненциальному закону. Следовательно, влияние солнечной энергии на процессы в недрах Земли пренебрежимо мало по сравнению с той

энергией, которая выделяется внутренними (эндогенными) источниками тепла. Основным источником современной тепловой энергии в недрах Земли является радиоактивный распад долгоживущих изотопов.

Согласно законам теплового излучения радиационная и термодинамическая температуры связаны степенной зависимостью $T_p = \sqrt[4]{\varepsilon} T_m$, где T_p – радиационная температура (величина, характеризующая суммарную, по всем длинам волн, энергетическую яркость излучающего тела), ε – излучательная способность объекта, T_m – термодинамическая температура.

Излучательная способность для каждого конкретного вещества, как уже отмечалось выше, является функцией длины волны и температуры. Она равна единице для абсолютно черного тела и может быть бесконечно малой для тела «абсолютно» белого. Для горных пород значения ε оцениваются величинами около 0,95 – 0,65. При $\varepsilon = 1$ термодинамическая и радиационная температуры равны. При уменьшении ε на порядок радиационная температура уменьшится в 0,562 (на полпорядка). Следует отметить, что карта радиационных температур всегда будет отличаться от карты термодинамических температур за счет неоднородной излучательной способности веществ даже в случае, если термодинамическая температура поверхностного слоя однородна.

Космическая тепловизионная съемка является одним из наиболее эффективных подходов в изучении состояния геологической среды и применяется в самых различных областях [12,54]. Съемка проводится тепловизором с регистрацией параметров в тепловом инфракрасном диапазоне спектра. В них фоточувствительным элементом являются особые кристаллы, чувствительные к электромагнитному излучению определенных длин волн. Измеренное излучение преобразуется в электромагнитные сигналы, фиксируемые на цифровых индикаторах [18].

Несмотря на многочисленные способы регистрации, формирование цифровых изображений базируется на одинаковых принципах. От сенсоров поступает аналоговый выходной сигнал в виде непрерывно меняющегося напряжения, форма и амплитуда которого связана с регистрируемым физическим явлением. Чтобы получить цифровое изображение, необходимо представить непрерывно поступающий сигнал

отсчетами по пространственным координатам и амплитуде. Представление координат в виде конечного множества отсчетов называется дискретизацией, а амплитуды – квантованием [82]. Полученное множество отсчетов записывают в виде матрицы действительных чисел, называемой цифровым изображением

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & \cdots & f(0,n-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(m-1,0) & \cdots & f(m-1,n-1) \end{bmatrix}$$

Правая часть этого равенства есть цифровое изображение. Каждый элемент этой матрицы называется пикселем или элементом изображения [20].

У элемента изображения p с координатами (x, y) имеются четыре соседа по вертикали и горизонтали, координаты которых задаются выражениями:

$$(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1).$$

Это множество пикселей называется четверкой соседей p и обозначается $N_4(p)$. Четыре соседа p по диагонали имеют координаты

$$(x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)$$

и обозначаются $N_D(p)$. Вместе с $N_4(p)$ они образуют восьмерку соседей, обозначаемую $N_8(p)$. Если точка (x, y) лежит на краю изображения, то некоторые из соседей оказываются за его пределами [20].

Пусть элементы изображения p, q и z имеют координаты $(x, y), (s, t)$ и (v, w) соответственно. Тогда функция D называется функцией расстояния или метрикой, если:

- $D(p, q) \geq 0$, причем $D(p, q) = 0$, когда $p = q$;
- $D(p, q) = D(q, p)$
- $D(p, z) \leq D(p, q) + D(q, z)$.

Евклидово расстояние между элементами p и q определяется следующим образом: $D_e(p, q) = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2}$. При таком подходе пиксели, находящиеся на расстоянии не более r от точки (x, y) , образуют круг радиуса r с центром в этой точке.

Расстояние D_4 между элементами p и q определяется как:

$D_4(p, q) = |x-s| + |y-t|$. В этом случае пиксели, находящиеся на расстоянии D_4 , меньшем или равном r от заданной точки (x, y) , образуют повернутый на 45° квадрат. Пиксели с расстоянием $D_4 = 1$ являются четверкой соседей для элемента (x, y) .

Расстояние D_8 между элементами p и q определяется как:
 $D_8(p, q) = \max(|x-s|, |y-t|)$. В этом случае пиксели, находящиеся на расстоянии D_8 , меньшем или равном r от заданной точки (x, y) , образуют квадрат. Пиксели с расстоянием $D_8 = 1$ являются восьмеркой соседей для элемента (x, y) .

1.2. Космические спектрозональные снимки – основа построения модели геологической среды

Одной из основных характеристик изображения является размер мельчайших различимых деталей на изображении, называемый пространственным разрешением. Например, американский космический аппарат Landsat-8 имеет пространственное разрешение 30 м, спектрорадиометр ETM+ спутника Landsat-7 – 60 м, TM (Landsat-5) – 120 м, MODIS (Terra и Aqua) – 1000 м, ASTER – 90 м.

Для отбора снимков Landsat используется электронный интернет-каталог Центра наблюдения и изучения ресурсов Земли (EROS) при Геологической Службе США (USGS) Earth Explorer. Снимки «Terra» и «Aqua» (прибор MODIS) предоставляются «Системой распространения данных о суше и атмосфере» (NASA, США) по интернет-каталогу LAADS Web. С помощью каталогов анализируется информация о наличии снимков определенного типа, оценивается их качество по данным в каталоге и уменьшенному изображению, а также оформляется заказ на архивные данные в необходимом для заказчика виде.

Доступные потребителям данные соответствуют различным уровням генерализации и масштабу съемки. Для обеспечения необходимого масштаба исследований выбирается система космического наблюдения с подходящим пространственным разрешением. При изучении крупных региональных геологических структур используется снимок MODIS. Изображения с Landsat применяются на локальном этапе исследований. В

целом при оценке строения геологической среды целесообразно привлекать материалы разного масштаба, что позволит увеличить информативность материала и существенно повысить достоверность построения объемной модели излучения среды.

Качество снимков зависит от показателей эффективности тепловизионной аппаратуры, которыми являются:

- минимальная обнаруживаемая разность радиационных температур объекта с определенными размерами и фоном, при которой объект раскрывается на выходном изображении;
- минимальная разрешаемая разность радиационных температур полос штриховой миры с определенным периодом и фоном, при которой штрихи миры разрешаются на выходном изображении;
- угловое разрешение – линейный период штриховой миры с определенной разностью радиационных температур с фоном, штрихи которой разрешаются на выходном изображении;
- ширина полосы захвата местности;
- число воспроизводимых градаций температур.

Основным условием достоверности результатов при дистанционном зондировании из космоса и достижения максимально возможной точности измерений является учет воздействующих на измерение факторов. Это температура окружающего воздуха, влажность атмосферного воздуха, скорость ветра, облачность, прозрачность атмосферы, отражающие и излучающие свойства земной поверхности, растительный покров, высота поверхности над уровнем моря, рельеф поверхности, тип почвы и степень ее увлаженности.

К примеру, в тепловом ИК диапазоне плотная облачность может полностью экранировать восходящее излучение Земли. На тепловизионных снимках в черно-белом отображении облака имеют оттенки черного цвета и являются самыми холодными объектами в кадре. Редуцирование исходных изображений, осложненных помехами разного вида, влияющими на регистрируемый сигнал, является первоочередной задачей обработки тепловизионных снимков.

Снижение влияния помех, включая радиометрическую и геометрическую коррекцию изображений, частично проводится службой EROS по известным алгоритмам. Составление мозаик, синтезирование и топографическая нормализация снимков входят в разрабатываемую систему предварительной обработки материалов и зависят от поставленных задач, масштаба съемки, выбранного подхода. Степень изменчивости растительного покрова в ряде случаев используют как индикаторный параметр.

Топографическая нормализация снимков. Способ коррекции снимков с учетом рельефа местности заключается в следующем: 1) снижение в исходном тепловом снимке неравномерного освещения склонов разной экспозиции; 2) геометрическое построение тепловых моделей с целью учета абсолютных отметок рельефа местности. Для этого целесообразно использовать высокоразрешающую карту рельефа местности, которая в дальнейшем применима при морфоструктурном анализе поля.

На первом этапе применяется методика топографической нормализации измеренного поля в условиях сложного рельефа местности изучаемого участка, вызывающего серьезные помехи при построении моделей эндогенного теплового поля Земли [49]. Задача решается с использованием алгоритма, приведенного в работе [137]:

$$\rho_{\lambda} = \rho_h (\cos \theta_z / \cos i)^K,$$

где ρ_{λ} – значение потока теплового излучения на выровненной поверхности; ρ_h – исходное значение потока теплового излучения (без учета рельефа); θ_z – солнечный зенитный угол; $\cos i$ – соответствующий элемент модели освещенности местности. Коэффициент K рассчитывается методом линейной регрессии по формуле:

$$\ln(\rho_{\lambda}) = \ln(\rho_h) + K \ln(\cos i / \cos \theta_z).$$

Достоинством метода Minnaert-Stratified Topocorrection является следующий подход: территория делится на участки с углами склонов меньше и больше 10^0 ; коррекция выполняется отдельно для этих участков, включающих низменные и гористые поверхности; не происходит искажение спектральных характеристик и качественно снимаются тени [112].

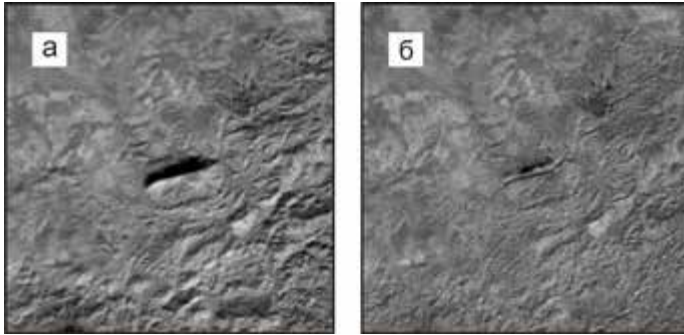


Рис. 1.5. Тепловизионное изображение до (а) и после (б) топографической нормализации

В расчетах используется цифровая модель рельефа местности, имеющая высокое пространственное разрешение (рис.1.5). Этапы работы алгоритма заключаются в создании модели освещенности местности прямо противоположной той, которая имела место в момент съемки. Затем спектральная яркость каждого пикселя изменяется пропорционально яркости этой диаметрально противоположной модели. Чем в более глубокой тени располагался участок земной поверхности в момент съемки, тем сильнее он подсвечивается. При использовании снимков, полученных в ночное время, топографическая нормализация не проводится.

Составление мозаики из снимков. Для Landsat ширина полосы обзора местности составляет 185 км с периодичностью регистрируемых 16 снимков в сутки, MODIS – 2330 км до двух снимков [22]. Главное предъявляемое требование к отбору – район исследований должен полностью покрываться космическими снимками. Основное условие, при котором достигается качественный результат, однородный характер формирования тепловых характеристик сцены по всей площади. При невозможности охвата одним снимком всей изучаемой территории, следует выбирать спутниковые изображения, незначительно отличающиеся по условиям их получения на одном витке, либо на соседних витках с близкими датами (рис.1.6). В случае отсутствия таких данных, можно составлять мозаику из изображений разных лет, но они должны быть выполнены в одно время года.

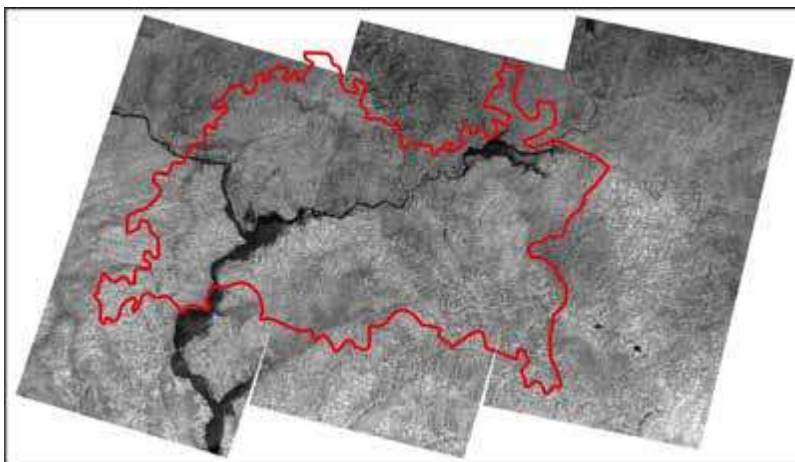


Рис. 1.6. Пример ИК съемки Landsat ETM+ территории Республики Татарстан за октябрь 1999 г.

Синтезирование космических снимков. Объединение изображений территории, полученных в разное время года, выполняется для ослабления влияния той части теплового излучения, которая обусловлена сезонными изменениями ландшафта (вариации растительного и снежного покрова, обводнение территорий, увлажнение почв, сельскохозяйственная деятельность). Эта операция усиливает низкочастотную составляющую

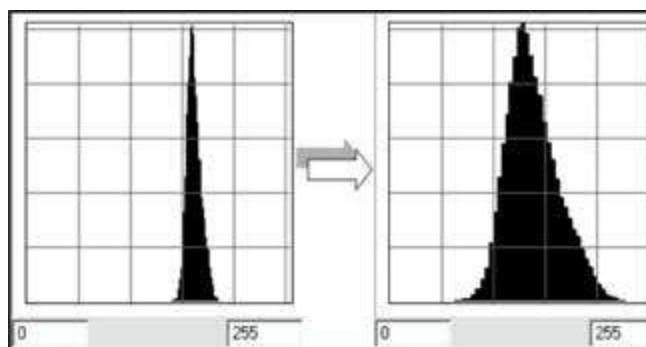


Рис. 1.7. Пример нормализации гистограммы

щую поля, которая вызвана эндогенным тепловым потоком от глубинных источников. Наиболее приемлемые для геологической интерпретации данные получаются при комбинации зимних и осенних снимков.

Процесс синтезирования изображений включает нормализацию распределения интенсивности ТП исходных снимков путем согласования динамического диапазона величины сигнала. Строятся гистограммы тепловых изображений, являющиеся графическим представлением распределения яркости снимка. Затем применяется контрастирование в котором медиана смещается в центр динамического диапазона (рис.1.7).

Объединение изображений производится по закону среднего степенного:

$$\bar{Q}_d(x, y) = \sqrt[d]{\frac{\sum_{i=1}^k Q_i^d(x, y)}{k}},$$

где $Q(x, y)$ – цифровое значение пикселя изображения с координатами $(x; y)$; k – количество синтезируемых снимков; d – показатель степени.

Используют следующие виды средних степенных значений: среднее гармоническое ($d=-1$), среднее геометрическое ($d=0$), среднее арифметическое ($d=1$), среднее квадратическое ($d=2$). Согласно правилу мажоритарности средних [88], с увеличением показателя степени d увеличивается и средняя величина $\bar{Q}_{-1}(x, y) \leq \bar{Q}_0(x, y) \leq \bar{Q}_1(x, y) \leq \bar{Q}_2(x, y)$. Следовательно, растет и дисперсия, характеризующая ширину распределения гистограммы.

С целью минимизации помех к снимкам выдвигается ряд условий: снимок не должен содержать высококонтрастных объектов; области изображения, имеющие значения ТП, близкие к границам цифрового диапазона, не должны совпадать по расположению с исследуемым объектом, располагаться вблизи него и занимать более 10% от площади снимка; снимок не должен содержать сильных шумовых помех; снимок должен иметь максимально возможное число градаций цифрового диапазона; тепловизионная информация должна заполнять всю площадь обрабатываемого цифрового изображения (в случае невозможности выполнения требования, незаполненные области должны быть минимизированы) [69]. В

связи с этим проводится преобразование снимка, включающее в себя удаление контрастных объектов, подавление помех путем применения адаптивных шумовых фильтров и контрастирование изображения для получения на нем максимально возможного числа градаций цифрового диапазона. Если не удастся привести снимок в соответствие с требованиями, он отбраковывается и не принимается к дальнейшей обработке.



«... Он научил посредством письменной трости
– научил человека тому, чего тот не знал.»
(Сура «Аль-Аляк», 96:4-5)

أَلَّمَ بِالْقَلَمِ
عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمِ

2.1. Основы решения обратной задачи пассивной тепловизионной томографии геологической среды

По определению классическая томография (греч. *τομή* – сечение) – метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством его многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях [91]. С точки зрения взаимного расположения источника излучения, объекта и приемника томографические методы могут быть разделены на следующие виды: *трансмиссионные*, когда регистрируется зондирующее внешнее излучение, которое проходит через пассивный (*неизлучающий*) объект, при этом частично ослабляясь; *эмиссионные*, при которых фиксируется излучение, выходящее из активного (*излучающего*) объекта с некоторым пространственным распределением источников излучения; *комбинированные трансмиссионно-эмиссионные*, при которых регистрируется вторичное излучение от источников, распределенных по объему объекта и возбужденных внешним излучением; *эхозондирование*, когда фиксируется зондирующее внешнее излучение, отраженное от внутренних структур пассивного объекта.

Основы метода вычислительной (*компьютерной*) томографии заложены в работах И. Радона, предложивший метод решения обратной

задачи интегральной геометрии [143], Кормака А. [113], Хаунсфилда Г.Н. [122]. Совершенствование технологий геофизических наблюдений и алгоритмов математической обработки [64] привело к качественно новым возможностям отображения результатов моделирования. В связи с этим, наибольшее развитие получила сейсмическая томография, которая была продемонстрирована Д.Л.Андерсоном в начале 80-х годов [116, 117, 4]. Метод, изначально появившийся в сейсмологии и инженерных изысканиях (*микросейсмика*), в настоящее время является крайне перспективным для прослеживания путей миграции жидкостей (*вода, нефть*), газов (*углеводород, пар*) и контроля над изменением проницаемости ослабленных зон. Позже появились сообщения о разработках томографических технологий, таких как электрометрическая [120], термическая [101], гравитационная [77] и магнитометрическая [127]. В вопросе томографии геотермических данных речь может идти не об эквиваленте сейсмической или электрической томографии, а только о степени приближения к этим методам. Послойное отображение результатов моделирования, к примеру, в гравиразведке и магниторазведке не может быть признано исчерпывающей характеристикой томографического подхода потому, что они принадлежат к классу некорректно поставленных задач по Ж. Адамару. В то же время, эффективным средством их решения численными способами является метод регуляризации, предложенный А. Н. Тихоновым [94].

Внедрение в геофизические методы исследования вычислительной томографии, открыло возможности изучения внутренней структуры неоднородностей земной коры. Геофизическая томография во всех своих разновидностях позволила с гораздо большей точностью устанавливать объемную структуру месторождений полезных ископаемых – нефти и газа.

В нашем случае рассматривается пассивная или эмиссионная тепловизионная томография, которая базируется на измерении лучистой энергии (*плотности потока теплового излучения*), направленной таким образом, чтобы «просветить» слои литосферы, которые исследователь не может непосредственно наблюдать. При этом массив горных пород неподвижен, так же как глубинные источники и приемники поля. Поэтому главная задача тепловизионной томографии внутренней структуры и физического состояния объекта состоит в получении двумерных (*плоских*) изображений параллельных поперечных сечений исследуемо-

го объекта [97,102]. В вопросе томографического подхода к интерпретации тепловизионных данных речь идёт о восстановлении свойств объекта по снимкам. Реализация томографического подхода в тепловизионном зондировании требует соблюдения ряда принципов.

1. *Возможность однозначного построения функций, описывающих свойства геологических сред в трехмерном пространстве, с помощью функций, заданных на плоскости.* Томографический подход есть один из способов решения обратной задачи. Приближение (*линеаризация*) может сопровождаться упрощениями модели физического процесса, направленное на примерное, но достаточно подробное и универсальное описание среды (*или возмущения теплового потока*), как совокупности стандартных, однородных внутри элементов. Согласно математической модели [91] на формирование поля влияют геометрическое ослабление и понижение излучения в веществе. Причем последним коэффициентом ослабления пренебрегать нельзя, в связи с его существенным влиянием на ТП.

Развиваемый подход [68] основывается на следующих положениях:

- среда состоит из множества стандартных элементов (источников излучения), расположенных в горизонтально-слоистой среде;
- число приемников значительно превышает число источников, за счет чего достигается непрерывность отображения свойств среды;
- система обладает избыточностью экспериментальной информации;
- глубинная структура среды восстанавливается по пространственному распределению плотности потока теплового излучения на дневной поверхности.

В работе использован способ пересчета поля в нижнее полупространство, который перспективен тем, что распределение поля на уровнях, расположенных ближе к источникам, более рельефно подчеркивает тонкие особенности структур последних. При этом данный способ обработки снимков имеет следующие ограничения.

Во-первых, продолжение поля на глубину возможно в том случае, если размеры снимка превышают в два-три раза глубину исследования объектов; снимок отражает эндогенное тепловое поле Земли; в пределах об-

ласти исследования находится хотя бы одна неоднородность глубинного строения Земли, создающая аномалию теплового поля; глубина центра исследуемого объекта превосходит его размеры.

Во-вторых, по мере увеличения глубины пересчета с использованием алгоритма пространственной фильтрации поля может нарастать погрешность определения геометрии объектов, обусловленная ошибками в исходных данных.

В-третьих, формирование обрабатываемого тепловизионного снимка не должно зависеть от экзогенных сторонних источников тепла. Одним из путей устранения нерегулярных погрешностей регистрируемого сигнала снимка, ослабления влияния поверхностных локальных неоднородностей, соизмеримых с шагом наблюдений (размером пикселя), является выбор сезонности тепловизионной съемки. Наибольшее число обработанных снимков для суши северного земного полушария по методу тепловизионной томографии приходится на период поздней осени до выпадения снега (рис.2.1). На этих снимках исключается маскирующее влияние активно вегетирующей растительности, и аномальные температурные контрасты за счет солнечного нагрева будут минимальными.

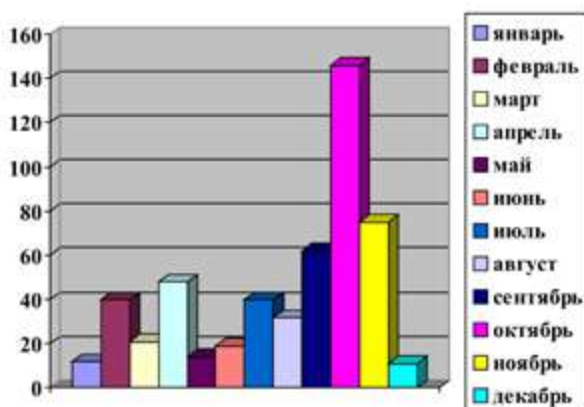


Рис. 2.1. Гистограмма распределения исходных космических снимков по временам года

2. Независимость результата «просвечивания» от внешней информации об исследуемом объекте. При моделировании теплового поля

алгоритм не предусматривает добавление дополнительной априорной информации к условию решения некорректно поставленной задачи. На входе расчетных процедур используют только числовые значения интенсивности излучения от объектов в виде растрового снимка, и результаты моделирования не зависят от внешней информации, необходимой при реализации обратной задачи идентификации. Следовательно, в получаемых тепловых моделях среды выполняется принцип томографического подхода.

3. Однозначная воспроизводимость результата в одинаковых условиях эксперимента. Сдерживающим фактором в развитии метода обработки является проблема разделения полезного сигнала и помех. В нашем подходе она решается на ранней стадии обработки (подбор спектронального снимка с учетом ряда критериев и синтезирования изображений) и на этапе расчетов поля путем пространственной фильтрации.

Процесс подбора требуемых снимков и оценка их качества для получения томографического изображения столь же важны, как и конечный результат – построение трехмерной картины неоднородности Земли. Именно отбор экспериментальных тепловизионных данных [38] и первичная подготовка являются тем необходимым основанием, на котором строится вся дальнейшая работа для получения качественного объемного изображения.

4. Непрерывная связь просвечивающего параметра с физическим состоянием зондируемой среды. Далее будет показано, что по исходному снимку, с начальными параметрами $S_0(x, y)$, возможно рассчитывать объемную модель среды $S(x, y, z)$. Трехмерное изображение теплового поля получают из матрицы значений, которые зарегистрированы в один и тот же временной период, при одинаковых природных условиях и характеризуют все физические процессы, происходящие на данный момент в изучаемом объеме среды.

Тепловой поток для изотропного полупространства остается постоянным на дневной поверхности. В условиях реальных сред происходит отклонение от нормальной модели, с образованием аномальных участков поля. Электромагнитные волны, генерируемые различными источниками, распространяются в неоднородных средах не прямолинейно, а

преодолевают сложный путь. Но когда на их пути встречается какая-то аномальная масса, то интенсивность поля будет или уменьшаться или, наоборот, увеличиваться в зависимости от состава, структуры, флюидного насыщения и плотности среды. Чем выше плотность, тем выше интенсивность вторичного излучения.

Томография это детальное изучение объекта, исполненное с тем расчетом, чтобы в соседних пунктах наблюдения регистрировались незначительные, легко коррелируемые от точки к точке изменения структуры или тепловые свойства среды. В этом смысле любая тепловизионная система как метод изучения геологического строения территории должна быть «*томографична*», поскольку размеры пикселя снимка минимальны и составляют для Landsat до 30 м и авиационного носителя (*вертолета, дирижабля*) несколько сантиметров. Принцип тепловизионной томографии обеспечен непрерывным прослеживанием вариации слоев разреза и четкой корреляции между данными, получаемыми в соседних точках. Это объясняется значительными размерами геологических структур земной коры достигающих десятков километров по сравнению с параметрами единичного пикселя.

В общем случае обратная задача тепловизионной томографии однозначного решения не имеет. В пределах погрешности регистрируемого сигнала теоретически можно найти множество различных распределений источников, создающих во внешнем пространстве одно и то же тепловое поле. Поэтому решение выполняется при следующих допущениях: измеряемые аномалии являются конечными; модели представляются в рамках градиентных сред; наиболее эффективно решаются региональные задачи, не требующие от интерпретатора получения модели среды с высокой точностью и детальностью; тепловая модель является составной частью геолого-геофизической информации, по которой устанавливаются общие черты и природа аномалий.

2.2. Моделирование геологической среды на основе пространственной фильтрации поля

Основной подход численного анализа изображений заключается в обработке разновременных космических снимков в дальней инфракрасной области электромагнитного спектра с расчетом объёмных моделей плотности потока теплового излучения, блоково-разломных структур и локальных источников тепла. Для решения геологических задач вычисляется эффективный поток и дифференциальные характеристики на заданных глубинах. В этом случае появляется возможность реализации основного принципиального достоинства космического зондирования, связанного с определением взаимного влияния аномальных объектов и разделением поверхностных и глубинных неоднородностей. Зависимость поля от строения и теплопроводности среды проявляется более наглядно, если эти модели представить в виде составляющих, вычисляемых самостоятельно: размерного параметра, связанного с теплопроводностью среды через плотность эндогенного теплового потока и эквивалентного ему точечного источника; безразмерного параметра, зависящего от амплитуды наблюдаемого поля и пропорционального плотности блоково-разломных структур. Термин плотность в тепловых моделях часто употребляется как синоним. Единообразия в употреблении этого термина не существует. Разработана градуировка по относительной шкале (*от минимального до максимального значений*) для того, чтобы вести сравнения моделей ТВТ с реальными геологическими средами. Безусловно, широкое использование других геофизических методов позволит провести нормировку плотности на количественном уровне, но она не будет отличаться определенностью.

Тепловые свойства сред в значительной мере зависят от их плотности [53]. Эта характеристика универсальная и связана со свойствами породообразующих минералов и структурой вещества. Для пород одной литологической принадлежности наблюдается положительная корреляция в виде линейной регрессии вида $\lambda = b\delta + n$, (здесь λ , Вт/(м·К) $\delta \cdot 10^{-3}$, кг/м³). Следует отметить, что аналогичная корреляция наблюдается для электропроводности и эффективной теплопроводности. Для дисперсных си-

стем с ростом пористости теплопроводность уменьшается. Парные связи λ с физическими параметрами у разных литологических характеристик (*песчанистостью, карбонатностью, глинистостью*) отличаются теснотой и видом уравнений. Зависимость $\lambda=f(\delta, v_p)$ функционально тесно связана в рамках теории Дебая для однородных тел (где $v_p \cdot 10^{-3}$ скорость продольных волн, м²/с). Косвенная оценка характеристик естественного залегания пластов по ТП, позволяет решать задачи тепломассопереноса на больших глубинах, использовать для практической оценки литологических типов пород, строить тепловые модели в единицах плотности и интерпретировать многофазные гетерогенные среды.

В работе рассматривается теплопроводность путем изучения стационарного поля, индуцируемого глубинным интегральным потоком теплового излучения Земли естественного происхождения [95]. Вектор распространения поля направлен к дневной поверхности. В этом случае нас интересуют тепловые процессы, обусловленные геологическими причинами, которые описываются дифференциальным уравнением эллиптического типа:

$$\alpha^2 \Delta T = f(x, y, z),$$

где f – функция, описывающая источники тепла, Δ – оператор Лапласа, α^2 – коэффициент температурной проводимости.

Из тепловизионных снимков нам известно распределение интенсивности электромагнитного излучения на земной поверхности в различных спектральных диапазонах. В нашем случае рассматривается низкочастотный инфракрасный диапазон, для которого применим закон Релея-Джинса. Согласно ему интенсивность равновесного теплового излучения абсолютно черного тела в дальнем ИК диапазоне прямо пропорциональна температуре излучающей поверхности.

$$W(\omega, T) = kT \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \quad (1)$$

Для реальной земной поверхности полное излучение будет отличаться от выражения (1) коэффициентом α , отражающим степень «*нечерноты*» излучающей поверхности. Кроме того, аддитивными членами, отвечающими за отраженный поток ($W_{отр}$) и переизлученный поток ($W_{лок}$) от на-

грева участков земной поверхности за счет внешних факторов (солнечное излучение, атмосферные явления, техногенная активность).

$$W = \alpha W(\omega, T) + W_{\text{отп}} + W_{\text{лок}}$$

Снизить влияние указанных факторов можно за счет усреднения по времени наблюдения и частотных диапазонов. Следует принять, что интенсивность излучения от участка дневной поверхности линейно пропорциональна ее температуре, вызванной эндогенными процессами.

Тепловизионное изображение, используемое для построения объемной модели среды, представляется как двумерная функция вида $f(x, y)$. Значение функции f в точке с координатами (x, y) является положительной скалярной величиной и отражает излучательную способность Земли. Поэтому функция $f(x, y)$ должна быть ненулевой и конечной

$$0 < f(x, y) < \infty$$

Восстановление объемного распределения тепловых источников по заданному распределению $S(x, y)$ тепловизионного снимка, измеренного на земной поверхности, является разновидностью известной обратной задачи граничного типа – расчета трехмерного теплового поля, когда известны значения поля на его границе.

Существует довольно много подходов к решению обратной задачи теплопроводности граничного типа [95, 8, 90]. Одним из возможных вариантов решения является использование метода пересчета наблюдаемого поля в нижнее полупространство, получившего широкое распространение при интерпретации потенциальных полей в геофизике. Данный прием базируется на возможности решать обратную задачу граничного типа для эллиптических уравнений как прямую задачу. В этом случае измеренные температурные поля на границах некоторого тела рассматриваются как заданные граничные условия. Одним из методов решения данной задачи является метод функции источника [95], при котором решение эллиптического уравнения ищется как свертка граничных условий с некоторым ядром, зависящим от формы граничной поверхности. Аналитическое решение методом функции источника известно для отдельных форм граничной поверхности, в том числе для сферы, ограничивающей шар, и плоскости, ограничивающей полупространство.

Для случая наблюдения за земной поверхностью (первых десятков километров) можно использовать второй вариант, рассматривая дневную поверхность как бесконечную плоскость. Функция источника имеет вид:

$$T(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{z_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{3/2}} S(x, y) dx dy,$$

где x и y – координаты по поверхности граничной плоскости, x_0, y_0, z_0 – координаты по объему нижнего полупространства.

Для обработки полевых снимков уравнение следует трансформировать. В результате операций дискретизации и квантования тепловизионного изображения возникает матрица действительных чисел из M строк и K столбцов. Координаты (x, y) становятся дискретными значениями. Для этих дискретных координат используются целочисленные значения. За начало координат принимается левый верхний угол изображения, где $(x, y) = (0, 0)$. Каждый элемент матрицы называется элементом изображения или пикселем.

Рассматриваемые тепловизионные изображения являются монохромными (черно-белыми). Значение интенсивности в произвольной точке с координатами (x_0, y_0) называется уровнем серого (l) или яркостью изображения в этой точке. Интервал $L_{\min} \leq l \leq L_{\max}$ называется диапазоном яркостей. Для простоты расчетов обычно его сдвигают по числовой оси, получая интервал $[0, L-1]$, края которого принимаются за минимальную ($l=0$) и максимальную ($l=L-1$) излучательную способность элементов теплового изображения. На практике диапазон яркостей зависит от аппаратуры. Современные устройства позволяют использовать дискретный интервал $[0, 2^{16}-1]$, но встречаются изображения с диапазоном яркостей $[0, 2^8-1]$.

Исходное изображение представляет собой начальный слой S_0 . Построение объемной модели заключается в получении из S_0 остальных слоев S_n по следующей формуле:

$$S_{ij}^n = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0}^M \sum_{k=0}^K \frac{n}{[(m-i)^2 + (k-j)^2 + n^2]^{3/2}} S_{mk}^0 \quad (2)$$

где $n = 1, N$, S_{ij}^n – элемент матрицы S_n с координатами (i, j) ; S_{mk}^0 – элемент матрицы S_0 с координатами (m, k) ; $i+n < M$, $j+n < N$, $i > n$, $j > n$.

Основным недостатком функции (2) является то, что для вычисления единственного элемента потребуется обрабатывать полный снимок. Это приводит к быстрому росту вычислительных затрат при построении объемной модели среды. Для их снижения целесообразно использовать только часть снимка в окрестности точки $(m, k, 0)$, зависящей от глубины n . Простейшим приближением к функции (2) является усреднение (рис.2.2):

$$S_{ij}^n = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} S_{mk}^0 \quad (3)$$

Из выражения видно, что каждый элемент второго слоя $S_{ij}^1 \in S_1$ зависит от элемента первого слоя $S_{ij}^1 \in S_0$, а также восьми его соседей. Аналогично каждый элемент слоя $S_{ij}^1 \in S_n$ зависит от элемента первого слоя $S_{ij}^0 \in S_0$, а также $(2n+1)^2 - 1$ его соседей. Данный подход является простым в расчетах, но не обладает необходимой точностью.

Более точную модель глубинного строения Земли можно получить, используя функцию расчета среднего геометрического. Она задается выражением:

$$G(S_0, n) = \left(\prod_{i=0}^n \prod_{j=0}^n S_0(i, j) \right)^{\frac{1}{n^2}} \quad \text{и} \quad S_{ij}^n = \left(\prod_{m=i-n}^{i+n} \prod_{k=j-n}^{j+n} S_{mk}^0 \right)^{\frac{1}{(2n+1)^2}} \quad (4)$$

Модель теплового поля, построенная с использованием (4), хорошо отражает среду и расположенные в ней объекты, но является сложной и малопроизводительной при автоматизации построений. С другой стороны, для упрощения расчетов с сохранением определенного уровня точности можно использовать функцию вычисления среднего гармонического:

$$G(S_0, n) = \frac{n^2}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{1}{S_0(i, j)}} \quad \text{и} \quad S_{ij}^n = \frac{(2n+1)^2}{\sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} \frac{1}{S_{mk}^0}} \quad (5)$$

Модель ТП, построенная по формуле (5), наиболее эффективно отражает глубинные объекты.

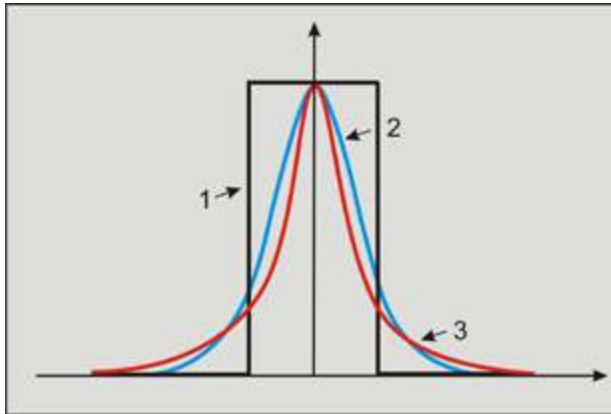


Рис. 2.2. Графики ядер свертки для: 1– усреднения, 2 – гауссиана, 3 – функции источника

Предыдущие модели строились в предположении, что распределение поля на тепловизионном изображении является равномерным. Однако, как правило, встречаются поля с распределением, близким к закону Гаусса. В этом случае для обработки дискретных снимков на практике целесообразно трансформировать формулу, применяя свертку с ядром Гаусса [68]:

$$s_{ij}^n = \frac{1}{2\pi\delta^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} s_{mk}^0 e^{-\frac{m^2+k^2}{2\delta^2}} \quad (6)$$

Главным достоинством гауссиана является то, что на расстоянии 3σ от центра он принимает достаточно малые значения, которые можно не использовать при построении модели. Варьируя коэффициент k , можно построить объемную модель с малым расстоянием между слоями. Структура теплового поля, рассчитанная с помощью функции распределения Гаусса, приводит к увеличению детальности на малых глубинах и сглаживанию объектов в пространстве.

Глубина исследований при построении объемной модели теплового поля Земли каждого слоя определяется по формуле $h_n = k \cdot n \cdot \delta_{xy}$, где n – номер слоя; h_n – глубина слоя n ; δ_{xy} – пространственное разрешение тепловизионного снимка; коэффициент k определяется с привлечением

априорных данных о геологическом строении региона. Таким образом, для расчета ТП на заданной глубине необходимо либо соответствующим образом подобрать размер снимка, либо его пространственное разрешение. Однако увеличение размера снимка ведет к резкому увеличению времени расчета модели, подчиняющемуся следующему закону $T = F(p^2)$, где T – время расчета модели, p – число пикселей снимка.

Другой возможностью получения требуемой глубины исследований является изменение пространственного разрешения снимка. Необходимо отметить, что максимальное число слоев S_n не может быть больше половины меньшей стороны снимка:

$$\begin{cases} n < M/2, \text{ если } M < N; \\ n < N/2, \text{ если } N < M. \end{cases}$$

Можно воспользоваться другим способом решения обратной задачи граничного типа для теплового поля с геометрическим центром плотности тепловой энергии источника. В задаче геологическая среда представлена геометрическим образом в виде прямоугольного параллелепипеда Ω , помещенного в однородное полупространство с теплопроводностью λ .

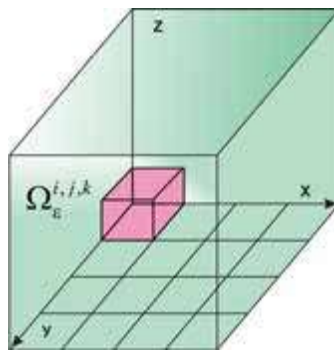


Рис. 2.3. Область моделирования теплового поля в среде

Покроем область моделирования трехмерной прямоугольной сеткой, которая разбивает весь объем на прямоугольные параллелепипеды (рис.2.3). Каждый элементарный параллелепипед характеризуется своей постоянной теплопроводностью:

$$\Omega = \left\{ (x, y, z) \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \underline{y} \leq y \leq \bar{y}, \underline{z} \leq z \leq \bar{z} \right\}$$

Для расчета теплового поля разобьем его по каждой оси координат на достаточно малое n число кубиков:

$$\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k} = \left\{ (x, y, z) \mid \begin{array}{l} x \in [x_i, x_{i+1}], y \in [y_j, y_{j+1}], z \in [z_k, z_{k+1}], x_{i+1} = x_i + \varepsilon, y_{j+1} = y_j + \varepsilon, z_{k+1} = z_k + \varepsilon, \\ x_0 = \underline{x}, x_{N_x} = \bar{x}, y_0 = \underline{y}, y_{N_y} = \bar{y}, z_0 = \underline{z}, z_{N_z} = \bar{z} \end{array} \right\}$$

где $i = 0, 1, \dots, N_x, j = 0, 1, \dots, N_y, k = 0, 1, \dots, N_z, \varepsilon$ – некоторое малое число, выбираемое таким образом, чтобы тепловой поток $I(x, y, z)$ внутри куба $\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k}$ по оси OZ оставался неизменным с практической точки зрения.

В соответствии с известными представлениями о тепловых процессах отдельный элемент $\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k}$ может быть представлен как источник, сток или проводник тепловой энергии. В общем случае в пределах объема $\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k}$ возможно существование нескольких источников или стоков. Но для упрощения расчета модели принимается, что куб $\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k}$ содержит не более одного источника или стока $\Omega_{\varepsilon}^{i,j,k} = (x, y, z) \mid x_i \leq x \leq x_{i+1}, y^j \leq y \leq y^{j+1}, z \in [z_k, z_{k+1}]$ с геометрическим центром тепловой энергии в точке (x^*, y^*, z) , где

$$x^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad y^* = \frac{y_j + y_{j+1}}{2}$$

С точки зрения известных геометрических образов процесс распространения тепловых потоков корректно представить гауссианом с симметричным ядром:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}},$$

где G – среднеквадратическое отклонение.

Тогда расчет значения теплового потока в любой точке (x^*, y^*, z^k) реализуется по формуле:

$$S(x^*, y^*, z^k) = \iint_{C(x^*, y^*, z^0)} S(x, y, z^0) \Phi(x, y) dx dy \quad (7)$$

где $C(x^*, y^*)$ – круг радиуса R^* , $S(x, y, z^0)$ – значение теплового потока в

точке (x, y, z^0) , $\Phi(x, y)$ – плотность распределения значений функции $\Phi(x, y, z^0)$.

Принимается, что плотность, определяемая в виде:

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}},$$

удовлетворяет следующим условиям:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\delta^2}} dx = 1 \quad \text{и} \quad \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2\delta^2}} dy = 1$$

Так как, функция $S(x^*, y^*, z^k)$ имеет не более чем точки разрыва первого рода, то интеграл (7) существует. Расчет значения функции в произвольной точке (x^*, y^*, z^0) реализуем с помощью многочлена:

$$S(x^*, y^*, z^0) = Ax + By + Cz + D,$$

где параметры A, B, C, D являются решением системы уравнений:

$$Ax_0y_0 + Bx_0 + Cy_0 + D = S_0,$$

$$Ax_1y_1 + Bx_1 + Cy_1 + D = S_1,$$

$$Ax_2y_2 + Bx_2 + Cy_2 + D = S_2,$$

$$Ax_3y_3 + Bx_3 + Cy_3 + D = S_3.$$

Таким образом, расчет значения теплового потока $S(x^*, y^*, z^k)$ в точке, имеет вид: $S(x^*, y^*, z^k) = AS_A + BS_B + CS_C + DS_D$, где

$$S_A = \iint_{C(x^*, y^*, z^0)} xy\Phi(x, y) dx dy \quad S_B = \iint_{C(x^*, y^*, z^0)} x\Phi(x, y) dx dy$$

$$S_C = \iint_{C(x^*, y^*, z^0)} y\Phi(x, y) dx dy \quad S_D = \iint_{C(x^*, y^*, z^0)} \Phi(x, y) dx dy$$

Расчет интегралов проводится для различных видов ячеек, попадающих в окружность радиуса R . В этом случае возможны условия, когда

ячейка полностью входит в окружность, одна из сторон ячейки является касательной к окружности, три из четырех углов ячейки принадлежат окружности, два из четырех углов ячейки принадлежат окружности (кроме второго случая), один из четырех углов ячейки принадлежит окружности. Основным преимуществом используемого подхода является повышенная точность вычисления теплового потока для различных геологических сред.

Следующим шагом моделирования является преобразование множества построенных слоев теплового поля в объемную модель блоково-разломных структур. Задача расчета модели структуры сводится к увеличению амплитуды малоинтенсивных положительных аномалий при относительном сохранении общего фона теплового поля. Учитывая, что на тепловизионном изображении яркость пикселей отражает величину теплового потока, мы применяем такое преобразование с использованием максимизирующего фильтра, которое выделяет области с относительно большими значениями элементов изображения. Его отклик по определенной окрестности задается выражением

$$b_{ij}^n = \max \{ s_{mk}^n \mid m = \overline{i-n, i+n}, k = \overline{j-n, j+n} \}.$$

Изображение, полученное с использованием максимизирующего фильтра, позволяет определить участки повышенного теплового потока, но линии разрывов среды на нем проявляются слабо. Для их выделения используется аналог оператора Лапласа. Тепловизионное изображение является функцией двух переменных $f(x,y)$, поэтому в данном случае лапласиан имеет вид

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}.$$

Чтобы применить уравнение Лапласа при обработке изображений, его необходимо выразить в дискретном виде на основе значений соседних пикселей. В случае дискретного изображения лапласиан имеет вид [20] для частной производной второго порядка по x , y :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \approx f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \quad (9)$$

Дискретная формулировка двумерного лапласиана является объединением этих двух составляющих:

$$\Delta f \approx f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (10)$$

Это выражение реализуется с помощью «маски», основанной на гладких фигурах – окружности.

а	0	1	0
	1	-4	1
	0	1	0

б	1	1	1
	1	-8	1
	1	1	1

Рис. 2.4. Типовая (а) и альтернативная (б) «маски», реализующие оператор Лапласа

Она дает изотропный результат для поворота на углы, кратные 90° . Диагональные направления могут быть включены в уравнение (10) добавлением еще двух членов. Вид каждого из них аналогичен выражениям (8) или (9), но дополнительно указываются координаты пикселей, расположенных по диагоналям. «Маска», соответствующая такому определению, представлена на рис.2.4 б. Она изотропна для поворотов на углы, кратные 45° . Обработка снимка с таким подходом является более эффективной, так как объекты на тепловизионных изображениях, как правило, имеют неправильные формы.

Следующим шагом в развитии численного моделирования, в отличие от выделения общих форм блоков, является идентификация проявлений

структурного разнообразия в виде линейно вытянутых участков среды, которые, в частности, могут маркировать разломы либо зоны повышенной трещиноватости, по которым происходит транзит флюида. Оси однородности (*гомогенность*) плотных структур и линеаментов (*разлом*) существенно дополняют геофизическую информацию о среде. Для расчета поля успешно применим один из подходов, основанный на минимизирующем фильтре и аналога оператора Лапласа

$$b_{ij}^n = \min \{ s_{mk}^n \mid m = \overline{i-n, i+n}, k = \overline{j-n, j+n} \}.$$

Составление демонстрационной графики выполняется с применением пороговой фильтрации изображений. В этом случае сечение или плановая конфигурация локальных зон соответствует тектоническим активным участкам, описание которых адекватно отражает наши представления о характере строения земной коры. Сходство морфологических элементов может наблюдаться в различном масштабе, вплоть до регионального подобия. Основы классического подхода морфоструктурного анализа инфракрасного снимка и карт-среза блоково-разломных структур позволяют построить схемы распределения линеаментов в пространстве. Графическое отображение в виде розы-диаграммы указывает на основные направления простирания локальных разломов осадочного чехла и региональных глубинных зон тектонических нарушений.

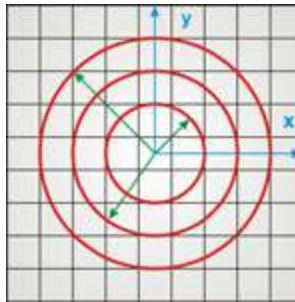


Рис. 2.5. Окружность, вписанная в «маску»

Расчет параметров квадратных «масок» на основе окружности. Используемые при обработке квадратные «маски» размерностью ($n \times n$) не всегда дают хороший результат. Для повышения его качества можно ис-

пользовать «маски», основанные на гладких фигурах, например на круге. Они представляют собой квадратные матрицы весовых коэффициентов. Значение каждого коэффициента равно площади пересечения данной ячейки с кругом радиуса $n/2$, вписанного в квадратную «маску».

Пусть имеется «маска», в которую по горизонтали и по вертикали входят n квадратных ячеек (n – нечетное число), а сторона каждой ячейки равна a . Тогда радиус круга, вписанного в «маску», $R = an/2$ (рис.2.5).

Всего возможно шесть различных случаев пересечения квадратной ячейки «маски» и круга:

- 1— ячейка не пересекается с кругом, площадь пересечения равна 0;
- 2— ячейка полностью входит в круг, площадь пересечения равна a^2 (a – сторона ячейки);
- 3— одна из сторон ячейки является касательной к окружности;
- 4— три из четырех углов ячейки принадлежат кругу;
- 5— два из четырех углов ячейки принадлежат кругу (кроме случая 3);
- 6— один из четырех углов ячейки принадлежит кругу.

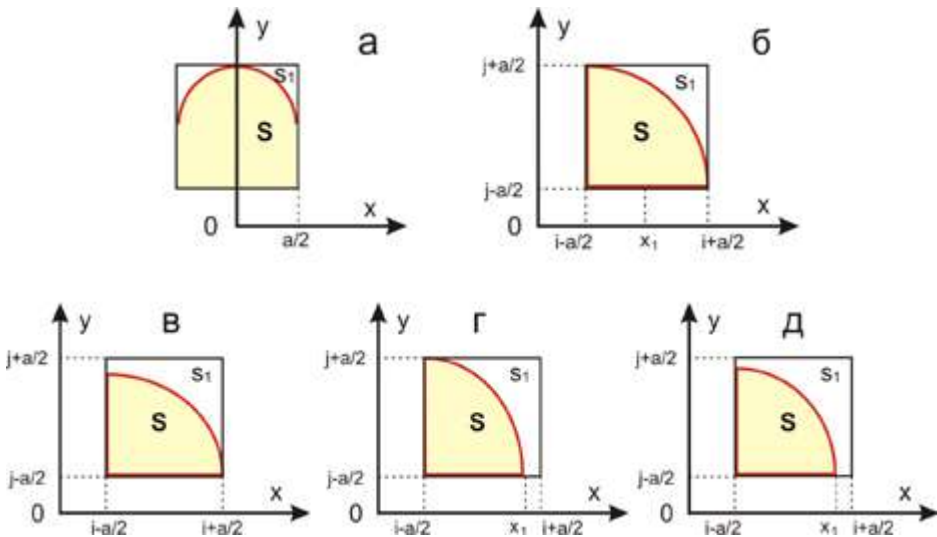


Рис. 2.6. Варианты пересечения круга и квадратной ячейки

Так как круг является фигурой, симметричной относительно центра, то для простоты вычислим площади только четверти круга, находящейся в первом квадранте. Расчет площади для первых двух случаев не представляет сложности. Поэтому рассмотрим с третьего по шестой случаи.

Третий случай, когда одна из сторон ячейки является касательной к окружности (рис. 2.6 а). Вне зависимости от размеров маски таких ячеек будет всегда четыре. В этом случае площадь $S = S_{\text{общ}} - 2S_1$,

$$S_1 = \int_0^{\frac{a}{2}} (R - \sqrt{R^2 - x^2}) dx = R \int_0^{\frac{a}{2}} dx - \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{R^2 - x^2} dx.$$

Так как $\int \sqrt{R^2 - x^2} dx = \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{x}{R} + \frac{x}{2} \sqrt{R^2 - x^2} + C$, то имеем:

$$S_1 = \frac{Ra}{2} - \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{a}{2R} - \frac{a}{4} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}.$$

$$\text{Следовательно } S = a^2 - Ra + R^2 \arcsin \frac{a}{2R} + \frac{a}{2} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}.$$

Четвертый случай, когда три из четырех углов ячейки принадлежат кругу (рис.2.6 б). Рассмотрим этот случай для ячейки с центром в точке (i, j) , находящимся в первом квадранте, то есть $i > 0$ и $j > 0$. В этом случае площадь $S = S_{\text{общ}} - S_1$. Для определения площади S_1 необходимо найти точку пересечения прямой с координатой $y = j + a/2$ и окружности $R^2 = x^2 + y^2$:

$$x_1 = \sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}.$$

Таким образом,

$$S_1 = \int_{\sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}}^{i + \frac{a}{2}} ((j + \frac{a}{2}) - \sqrt{R^2 - x^2}) dx = (j + \frac{a}{2}) (i + \frac{a}{2} - \sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}) - \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{i + \frac{a}{2}}{R} + \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}}{R} - \frac{i + \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (i + \frac{a}{2})^2} + \frac{\sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}}{2} (j + \frac{a}{2}).$$

$$S = a^2 - (j + \frac{a}{2})((i + \frac{a}{2}) - \sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}) + \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{i + \frac{a}{2}}{R} - \\ - \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}}{R} + \frac{i + \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (i + \frac{a}{2})^2} - \frac{\sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2}}{2} (j + \frac{a}{2}).$$

Пятый случай, когда два из четырех углов ячейки принадлежат кругу. В первом квадранте возможно два варианта. В случае пересечения аналогично (рис.2.6 в):

$$S = \int_{i - \frac{a}{2}}^{i + \frac{a}{2}} (\sqrt{R^2 - x^2} - (j - \frac{a}{2})) dx = \frac{R^2}{2} (\arcsin \frac{i + \frac{a}{2}}{R} - \arcsin \frac{i - \frac{a}{2}}{R}) + \frac{i + \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (i + \frac{a}{2})^2} - \\ - \frac{i - \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (i - \frac{a}{2})^2} - (j - \frac{a}{2}) a .$$

В случае пересечения аналогично (рис. 2.6 г):

$$S = \int_{j - \frac{a}{2}}^{j + \frac{a}{2}} (\sqrt{R^2 - y^2} - (i - \frac{a}{2})) dy = \frac{R^2}{2} (\arcsin \frac{j + \frac{a}{2}}{R} - \arcsin \frac{j - \frac{a}{2}}{R}) + \frac{j + \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (j + \frac{a}{2})^2} - \\ - \frac{j - \frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2 - (j - \frac{a}{2})^2} - (i - \frac{a}{2}) a .$$

Шестой случай, когда один из четырех углов ячейки принадлежит кругу (рис.2.6 д). Рассмотрим этот случай для ячейки с центром в точке (i, j), находящимся в первом квадранте. Для определения площади S необходимо найти точку пересечения прямой $y = j - a/2$ и окружности $R^2 = x^2 + y^2$:

$$x_1 = \sqrt{R^2 - (j - \frac{a}{2})^2} . \text{ Таким образом,}$$

$$\begin{aligned}
S &= \int_{i-\frac{a}{2}}^{\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2}} (\sqrt{R^2-x^2} - (j-\frac{a}{2})) dx = \frac{R^2}{2} \left(\arcsin \frac{\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2}}{R} - \arcsin \frac{i-\frac{a}{2}}{R} \right) + \\
&+ \frac{\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2}}{2} (j-\frac{a}{2}) - \frac{i-\frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2-(i-\frac{a}{2})^2} - (j-\frac{a}{2}) \left(\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2} - (i-\frac{a}{2}) \right) = \\
&= \frac{R^2}{2} \left(\arcsin \frac{i-\frac{a}{2}}{R} - \arcsin \frac{\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2}}{R} \right) - \frac{i-\frac{a}{2}}{2} \sqrt{R^2-(i-\frac{a}{2})^2} - \\
&- (j-\frac{a}{2}) \left(\frac{\sqrt{R^2-(j-\frac{a}{2})^2}}{2} - (i-\frac{a}{2}) \right).
\end{aligned}$$

2.3. Формирование региональной составляющей теплового потока

Реализован новый подход в интерпретации тепловизионных снимков, основанный на изменении сигнала плотности потока теплового излучения в значения мВт/м² и формировании объемной модели геологической среды. Последовательное трансформирование сигнала в тепловой поток включает следующие основные этапы.

1. Расчет объемной модели ТП путем решения дифференциального уравнения эллиптического типа в виде свертки краевых условий с ядром Гаусса и/или на основе метода функции источника (рис.2.7). Целью вычислений является выявление закономерностей изменения теплового потока для глубоких горизонтов.

2. Пересчет исходного сигнала *Terra/Aqua-MODIS* в значения ТП земной коры. Анализ эмпирического распределения потока с последующим вычислением статистических поправок, определение связи исходного сигнала со значением температур, измеренных в скважинах, выбор функции для горизонтально-слоистого разреза при отсутствии неоднородности. Погрешность измерения не должна превышать 5%.

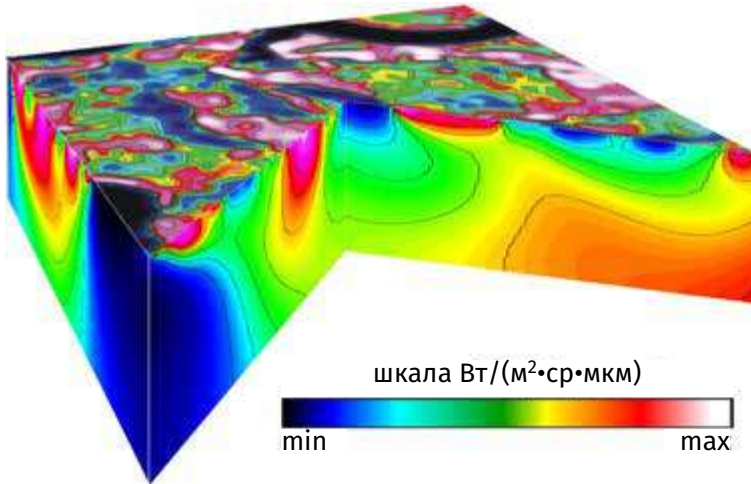


Рис. 2.7. Объемная модель плотности потока теплового излучения среды

3. Сравнение нормального закона изменения теплового поля с полученной моделью теплового потока для осадочного слоя и поверхности раздела кора-мантия:

$$Q_{\text{рез}}^M(x_0, y_0, z_0) = \begin{cases} Q_1^M(x_0, y_0, z_0), & \text{если } z_0 < h_{\text{осад}} \\ Q_1^M(x_0, y_0, z_0) + \Delta Q \cdot z_0, & \text{если } z_0 > h_{\text{осад}} \end{cases}$$

В восстановлении геотермического поля используются данные тепловизионной томографии о неоднородности коры. Процедура интегрирования поля позволяет провести последующее детальное разделение источников аномалий в плане и разрезе с привязкой каждого объекта к шкале эффективных глубин. Результатом трансформаций является модель среды, адекватная реальному тепловому потоку, который на поверхности Земли может изменяться от 30 до 200 мВт/м². Слабое изменение ТП может возникать в том случае, если недостоверно выбран градиент нарастания нормального поля.

Эффективность методики подтверждена результатами ее практического использования для решения прикладных задач. В ряде случаев учитывалось влияние более высокой теплопроводности ЗК по отношению к

нормальным значениям. Например, ТП для платформенной и геосинклинальной коры заметно различается из-за различной активности эндогенных процессов, созданных в результате тепловой генерации пород. Поэтому в качестве краевых условий, используются априорные значения температур на глобальных границах раздела сред – кристаллическом фундаменте, границе Конрада или поверхности Мохоровичича.

4. Реконструированный региональный тепловой поток следует применять для восстановления стационарного локального поля неоднородной среды, рассчитанного по снимкам Landsat. Для этого определяется связь между значениями моделей Landsat-TM/ETM+ и Terra/Aqua-MODIS с доверительным интервалом не более 5%. Пересчет модели проводится по выявленному закону изменения поля. В результате получают распределения локального теплового потока до глубины 12 км.

В данном случае предусмотрено интервальное изучение тепловых свойств среды при условии изменчивости диаграммы по скважине. Это позволяет установить степень влияния разных стратиграфических горизонтов осадочного чехла на интегральную характеристику ТП. С этой целью находится зависимость значений тепловизионного пикселя и ТП по результатам измерений в скважинах. В последующем выполняется расчет статистических поправок и интервальной вариации ТП осадочного чехла. Точность аппроксимации поля в большей степени определяется выборкой, зависящей от количества скважин и степени изученности площади.

5. Дальнейшее преобразование поля выполняется в рамках геоинформационных систем, которое сводится к визуализации объемной плотности источников и раскрытию природы образования регионального аномального поля. Положение и морфология тепловых источников, вызванных неоднородностью среды, и механизм теплопереноса в среде изучаются путем непосредственного прослеживания изолиний и величины градиента поля на заданном срезе или по заранее выбранной сети профилей. Построение разрезов и карт в единицах мВт/м² и векторов составляющих теплового поля направлено на визуализацию результатов.

Геодинамическая трактовка сводится к оценке плоскости (пространственной ориентации), фронта (исходного залегания источников) и мощности (ширины) регионального потока. Степень сплошности и кон-

трастности потока отражают меру интенсивности, определяя зрелость складчатости. Оба свойства не имеют между собой прямой корреляции. Тепловой поток может приобретать вергентную (расходящуюся), линейную или мозаичную формы.

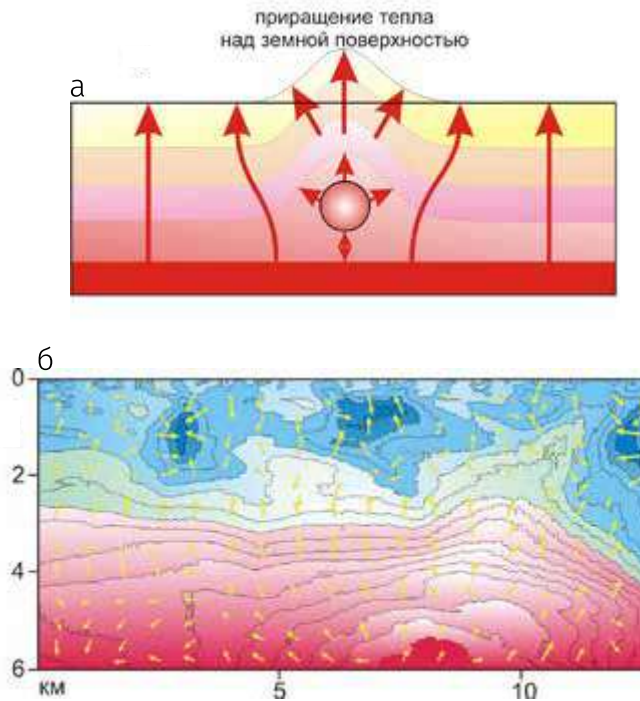


Рис. 2.8. Форма векторов теплового поля в однородном пространстве с дополнительным точечным источником (а) и в реальной природной среде (б)

На рис.2.8 приведена типовая ситуация изменения плотности ТП в зависимости от неоднородности в источнике энергии и в среде ее транзита. Показаны векторы тепловых потоков в общепринятом их значении, от источника тепла к приемнику. Четкая форма аномалии свидетельствует о том, что ее источник расположен на меньшей глубине. На практическом примере демонстрируются холодные (синий цвет) и горячие (красный) объекты. Стрелки показывают направление истоков и стоков тепла. В реальных средах при фильтрации низкотемпературной жидкости в проти-

в противоположном направлении тепловому потоку, векторы приобретают нисходящий вид или сближаются в пространстве.

Рассматривая тепловую эффективность среды как отношение тепловой энергии локальных объектов к общему выделению тепла можно проводить глубинное районирование физического строения земной коры. Исходя из интегрального потока, расположения тепловых источников, геоблоков и зон разломов следует разделять наблюдаемое поле в литосфере на ряд составляющих, обусловленных очагами радиоактивного разогрева, зонами частичного плавления, внедрившимися мантийными астенолитами, потоками гидротермальных флюидов.

2.4. Формирование локальной составляющей теплового поля

Геофизические аномалии имеют различную амплитуду, форму, размеры, так как зависят от строения и глубины залегания геологических объектов. Различают следующую морфологию поля: изометричную; полосообразную (*создается геологическими объектами, которые имеют постоянное поперечное сечение и простираются в одном направлении*); мозаичную (*создается несколькими объектами, которые располагаются на различных глубинах*). Для изучения среды прибегают к математическим преобразованиям путем пересчета исходного поля. На этом принципиальном положении основана интерпретация наблюдаемых геофизических полей.

Локальное поле плотности потока теплового излучения $L(x, y)$ вычисляется по формуле:

$$L(x, y) = S(x, y) - R(x, y),$$

где $S(x, y)$ – исходное ТП, $R(x, y)$ – региональная составляющая теплового поля.

Для упрощения процесса расчета регионального поля можно использовать аппроксимацию на основе применения «типовых» распределений. Учитывая, что распределение теплового поля, создаваемого объектом в среде, близко к нормальному закону, в качестве аппроксимирующей функции выбирается распределение Гаусса вида:

$$R(i, j) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} S(m, k) e^{-\frac{m^2+k^2}{2\delta^2}}$$

Параметр δ определяет глубину, для которой выстраивается региональное поле, и выбирается исходя из залегания объекта.

Для более точного формирования локального поля применимы плоские функциональные аппроксимации в виде полиномов низких степеней. Для глобальных моделей целесообразно выбирать разложения по сферическим (шаровым) функциям с использованием подхода адаптивного регрессионного моделирования (АРМ) при обработке данных [13]. В качестве описания регионального поля (R) на плоскости и сегменте сферической поверхности предлагается аппроксимирующая модель вида:

$$R(\lambda, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta),$$

где θ, λ – сферические координаты точки; C_{nm}, S_{nm} – амплитуды гармоник $C_{nm} P_{nm}(\cos \theta) \cos(m\lambda)$ и $S_{nm} P_{nm}(\cos \theta) \sin(m\lambda)$; $P_{nm}(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m .

В результате процедуры преобразования поля для заданных глубин интерпретатор получает возможность детального изучения геологического строения горизонтов осадочного чехла и кристаллического фундамента, выделения кольцевых структур, зон тектонических нарушений (разломов), участков перетоков флюидов в проницаемых средах и их накопления в пористых средах.

На каждой карте локального теплового поля с помощью цветовой раскраски выделяют различные по интенсивности горячие и холодные зоны, которые в ряде случаев можно дешифровать как структурные формы поднятий и опусканий. В местах интенсивных положительных тепловых аномалий, разделенных между собой холодной зоной, происходит образование зоны растяжения с уступообразными участками и слабым градиентом поля. Плановое изменение поля наглядно обрисовывают эти изменения. Поэтому интерпретация объемной модели потока теплового излучения геологической среды включает: районирование участка по интенсивности потока; построение геотермических отражающих границ

по глубинам; определение природы аномалии образующих объектов; изучение флюидодинамических условий; выделение геотермических признаков, связанных с тепловыми аномалиями и позволяющих пространственно локализовать в среде геологические объекты.

2.5. Расчет локальных тепловых источников на основе непрерывного вейвлет-преобразования снимка

Дополнительным способом обработки тепловизионных снимком является пересчет поля в область источников тепловых аномалий с помощью вейвлет-преобразований [69]. Термин «вейвлет» (от французского «ondelette») дословно переводится как «короткая волна». Такое преобразование сигнала состоит в его представлении в виде обобщенного ряда по системе базисных функций [108], сконструированных из исходного (материнского) вейвлета $\psi(t)$ за счет операций сдвига b и изменения масштаба a :

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) .$$

Множитель $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего коэффициента a . Таким образом, для заданных значений a и b функция $\Psi_{ab}(t)$ и есть вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом $\psi(t)$. Простейшим примером такой функции является вейвлет Хаара, который определяется соотношением:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2, \\ -1, & 1/2 \leq t < 1, \\ 0, & t < 0, t \geq 1. \end{cases}$$

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $S(t)$ выглядит следующим образом [25]:

$$W_S(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

или в случае если a и b принимают только дискретные значения:

$a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, m и n пробегает значения из Z ,

величины $a_0 > 1$, $b_0 > 0$ – фиксированные:

$$W_S(a, b) = a_0^{-m/2} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt.$$

Следует отметить, что если исследуемый сигнал $S(t)$ представляет собой одиночный импульс длительностью τ_u , сосредоточенный в окрестности $t = t_0$, то его вейвлет-спектр будет иметь максимальное значение в окрестности точки с координатами $a = \tau_u$, $b = t_0$.

Известно [25], что прямое вейвлет-преобразование содержит информацию как об анализируемом сигнале, так и об анализирующем вейвлете. Это позволяет получить объективную информацию о сигнале благодаря своим свойствам, которые не зависят от выбора вейвлета [2]:

- *линейность*: $[\alpha S_1(t) + \beta S_2(t)] = \alpha W_1(a, b) + \beta W_2(a, b)$;
- *сдвиг*: смещение сигнала во временной области на b_0 ведет к сдвигу вейвлет-образа также на b_0 : $W[S-(t-b_0)] = W(a, b-b_0)$;
- *масштабирование*: растяжение (сжатие) сигнала приводит также к растяжению (сжатию) его в области $W(a, b)$:

$$W[S(t/a_0)] = \frac{1}{a_0} W\left(\frac{a}{a_0}, \frac{b}{a_0}\right);$$

- *дифференцирование*:

$$W[d_t^m S] = (-1)^m \int_{-\infty}^{\infty} S(t) d_t^m [\psi_{ab}(t)] dt,$$

где $d_t^m = d^m[\dots]/dt^m$; $m \geq 1$. Из этого свойства следует, что проигнорировать, например, крупномасштабные и проанализировать мелкомасштабные составляющие $S(t)$ можно дифференцированием нужное число раз вейвлета или самого сигнала.

Все предыдущие построения используются для вейвлет-анализа одномерных функций. При решении практических задач зондирования требуется анализ функций от двух переменных $S(x, y)$. В этом случае в качестве вейвлета используют функции вида:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \psi\left(\frac{x - b_1}{a_1}, \frac{x - b_2}{a_2}\right),$$

где a_1 и a_2 , b_1 и b_2 – значения a и b по каждому измерению.

При обработке реальных массивов данных, вейвлет для двумерного пространства получают как тензорное произведение одномерных преобразований по каждому измерению [78]. Таким образом, на двумерной плоскости происходит анализ по горизонтали, вертикали и диагонали с одинаковым разрешением.

Достоинством тензорного произведения является то, что его использование вместо двумерного вейвлета требует меньших вычислительных затрат. При последовательной реализации одномерных вейвлет-преобразований затраты на один элемент массива равны $2(2N - 1)$ операций сложения и умножения, где N – длина окна. В случае же прямой реализации двумерного вейвлет-преобразования с окном размерностью $(N \times N)$ требуется $(2N^2 - 1)$ арифметическая операция.

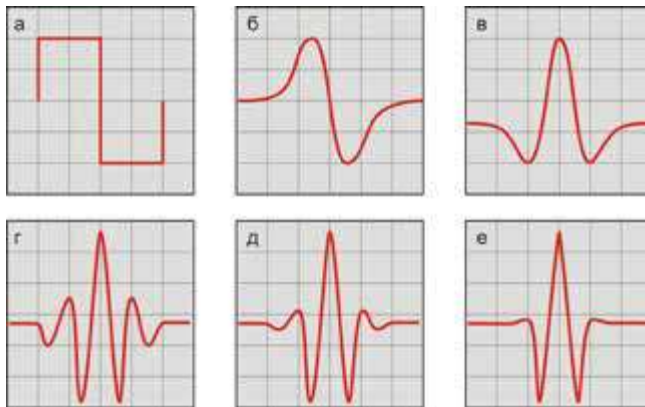


Рис. 2.9. Виды вейвлетов: а – Хаара; б – Гаусса первого порядка (WAVE); в – Гаусса второго порядка (MHAT); г – Гаусса восьмого порядка; д – Добеши четвертого порядка; е – Койфмана второго порядка

Основные формы вейвлетов, наиболее близко отвечающие распределению тепловизионных сигналов, представлены на рис.2.9. Наилучшая

локализация объекта в двумерном пространстве достигнута при использовании вейвлетов Гаусса и Койфмана второго порядка [69].

При исследовании теплового поля Земли методами вейвлет-преобразования встают вопросы применимости тех или иных вейвлетов для выявления отдельных источников тепла. Следует учитывать то обстоятельство, что прямое вейвлет-преобразование одновременно содержит информацию об анализируемом сигнале и вейвлете [25]. По-видимому, более эффективным решением является использование функции (в качестве анализирующего вейвлета), которая отражает некоторые характеристики источников поля. Вейвлет-спектр такой функции будет обладать ясным физическим смыслом, что значительно упростит его интерпретацию. При анализе теплового поля такие функции могут быть получены путем дифференцирования ряда решений уравнения теплопроводности.

Рассмотрим уравнение теплопроводности для стационарного теплового поля, заданного следующим образом – $a^2 \Delta T = f(x, z)$. Одним из возможных способов решения данного уравнения [95] является метод источников. В этом случае решение задается сверткой граничных условий с ядром:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{z}{[(x_0 - x)^2 + z_0^2]^{3/2}} \cdot$$

В качестве анализирующего вейвлета предлагается использовать вторую производную данного ядра по z при $x_0 = 0$:

$$\psi(x) = \frac{\sqrt{z^2 + x^2} (6z^3 - 9x^2 z)}{2\pi(z^2 + x^2)^4} \cdot$$

Данная функция непрерывно дифференцируема и имеет нулевое среднее, следовательно, для нее выполняется условие допустимости для вейвлетов [58]. В дальнейшем она получила название вейвлет Тихонова-Каримова второго порядка. График функции при $z = 10$ представлен на рис.2.10. Нетрудно заметить, что масштабирование функции достигает-

ся путем изменения z . Поэтому вейвлет спектр W логично рассматривать как функцию от переменной z (характеризующей глубину) и b (сдвиг вейвлета по оси x).

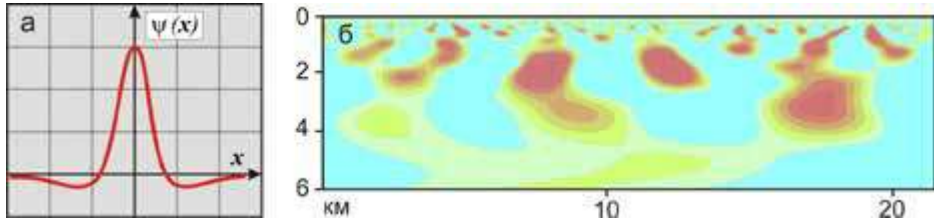


Рис. 2.10 Вид вейвлета Тихонова-Каримова второго порядка по источнику поля (а) и следствие моделирования разреза (б)

Оценка устойчивости работы алгоритма проводилась на основе инверсии теплового поля, полученного путем решения прямой задачи от объектов простой геометрической формы с использованием программы Comsol Multiphysics 4.0 (*FEMLab*) [114]. Программа представляет собой пакет моделирования одно-, двух- и трехмерных синтетических моделей, с помощью которого решаются системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов для задач термодинамики.

Основная цель тестирования состоит в определении кластера моделей среды, которые с допустимой погрешностью описываются предлагаемым алгоритмом. В качестве изучаемых трехмерных моделей, с учетом простоты их расчета и дальнейшего преобразования, нами приняты различные виды шарообразных высокотемпературных точечных источников, находящихся в изотропных средах. Количественный и качественный состав источников отражает этапы усложнения моделей среды. Также проведен расчет двумерных геологических объектов в виде неоднородностей осадочного чехла, выступов поверхности кристаллического фундамента (по форме напоминающих структуры горст и грабен), тектонических нарушений. Модели наглядно демонстрируют разрешающую способность метода при решении обратной задачи, с оценкой средней погрешности в построении геометрических образов природных объектов, и позволяют оценить прикладное значение тепловизионного зондирования.

В качестве примера рассмотрим тепловое поле, созданное одиночным сферическим телом, расположенным в однородной среде. Физическая модель среды представляет собой металлическое шарообразное тело радиусом 0,5 м, расположенное на глубине 2 м в мощном слое глинистых пород. За исходные данные при моделировании поля приняты температуры 350 К шара и 293 К атмосферы. Положительное приращение значений температур шара и вмещающей среды говорит о высокотемпературной аномалии над рассматриваемым объектом, что наглядно видно на рис.2.11.

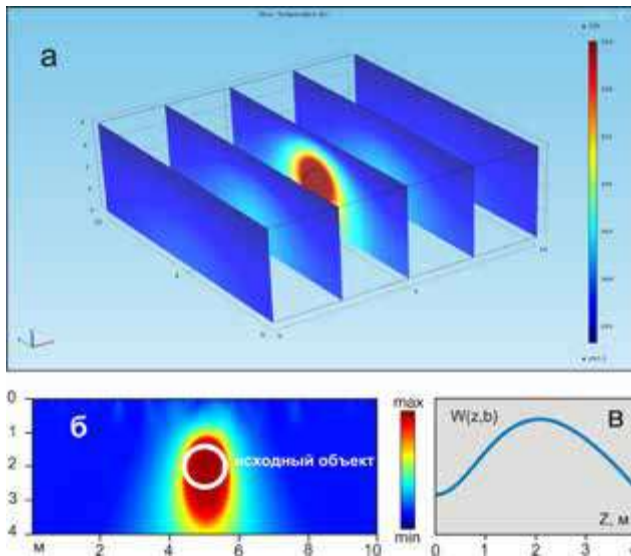


Рис. 2.11. Вейвлет-спектр теплового поля от шарообразного объекта в однородной среде: объемное представление шара (а), вейвлет-спектр при решении обратной задачи (б), график коэффициентов вейвлет-преобразования вблизи источника (в)

Вейвлет-спектр теплового поля при решении обратной задачи отражает положительную аномалию вблизи действительного расположения объекта. График вейвлет-коэффициентов показывает, что максимум данной аномалии отмечается при $z = 2$ м, это соответствует местоположению центра шара в физической модели среды. Следовательно, основные особенности теплового поля сохраняются, поле дифференцировано,

объект четко выделяется и имеет явную шарообразную форму. Погрешности определения глубины до центра объекта и горизонтального расположения стремятся к нулю. Таким образом, неоднородности геологической среды, проявляющиеся в тепловом поле, могут быть выделены предлагаемым вейвлетом в виде аномальных значений коэффициентов вейвлет-преобразования. При этом глубина залегания данных аномалий может быть напрямую сопоставлена с масштабирующей переменной z .

Используя при обработке класс изометричных, локальных множественных источников (*алгоритм вейвлет-преобразования*) и последовательную корреляцию эквивалентных источников по латерали, можно сказать, что мы частично реализуем томографический подход, который регламентируется достаточно широким начальным условием. В том числе: глубина залегания до центра источника должна превышать в 2–3 раза его горизонтальные размеры; источник в плане должен быть как минимум в 3–5 раз больше размера пикселя снимка; взаимная удаленность источников по латерали должна превышать его горизонтальные размеры (расстояние, на котором не сказывается эффект наложения аномального поля); не рассматривается случай, когда над двумя или несколькими сближенными по глубине источниками возникает одна аномалия, эквивалентная одному объекту. При соблюдении этих граничных условий с помощью развиваемых алгоритмов вейвлет-анализа представляется возможным выявлять в пространстве локальные эндогенные тепловые источники, восстанавливать геотермическую слоистость разреза и внутреннюю структуру объекта по проекции данных. Степень приближения рассматриваемых тепловых моделей к геологической реальности оценивается на заключительном этапе интерпретационного процесса путем сопоставления с априорными геологическими и геофизическими данными.

2.6. Исследование динамики природной среды

Изучение природы среды по спектральной отражательной способности минералов на поверхности Земли. Геологические структуры изучают по мультиспектральным электромагнитным излучениям сразу в нескольких каналах. Энергия и спектр эмиттерного излучения, его интенсивность

и диапазон зависит от температуры излучающего тепло объектов. Среда имеет разную эмиссию и может успешно дешифрироваться.

Общий спектр встречающегося в природе электромагнитного излучения делится на несколько областей. Границы между ними условны. Полезная информация об энергии потока рассеяния, поглощения, отражения зависит от форм элементов ландшафта, свойств горных пород (*минерального состава*) и почв. Рельеф подчеркивает морфологию структур, которая сохраняет свои очертания на малых глубинах. Используя всю полноту спектральной характеристики объекта на основе пространственной фильтрации сигналов, возможно получать специфические данные в диагностике среды. Для этого необходимо воспользоваться оптимальными зонами спектра природных сред KA Landsat. За основу приняты цвета, соответствующие монохроматическим излучениям с длиной волны 0,45–0,52 мкм (*синий – Blue*), 0,53–0,6 мкм (*зеленый – Green*), 0,63–0,68 мкм (*красный – Red*), а также ближнем инфракрасном диапазоне 0,85–0,89 мкм. Комбинация трех каналов дает цветное синтезированное изображение RGB, по которому проводится распознавание и разделение полезного сигнала с пространственным разрешением на местности 30 м. Неоднородности энергетической яркости увязывают с природными изучаемыми объектами и минералами.

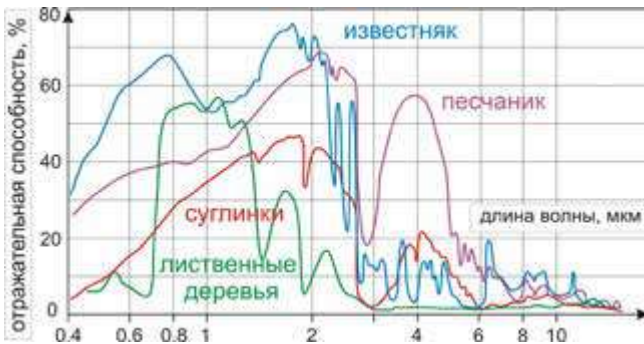


Рис. 2.12. Спектральная отражательная способность природных образований

При рассмотрении спектрально-тепловизионных данных необходимо учитывать тип пород, слагающих верхнюю часть осадочного чехла, который влияет

на отражательную способность изучаемых ландшафтов. Для этого приведены спектры отражения наиболее часто встречаемых горных пород. Их характеристика показывает высокую изменчивость отражательной способности в широком интервале длин волн. Наибольшие значения амплитуд находятся в коротковолновом ИК спектре. По сравнению с растительным покровом максимумы спектральных кривых пород смещены в область больших длин волн и имеют повышенные значения в тепловом диапазоне (рис.2.12).

В настоящее время разработаны и описаны в многочисленных публикациях методы и средства интеграции информационных технологий сбора, обработки и использования пространственных коротковолновых данных. Однако по ряду причин методы не нашли широкого применения при поисках рудных и нерудных полезных ископаемых. Задачу определения вещественного состава горных пород можно решать путем классификации выделенных пикселей снимка в ближнем и коротковолновом инфракрасном спектре. Для повышения достоверности и точности определения геометрических границ при спектральном анализе снимков необходимо создание не только стандартных RGB цветowych синтезированных изображений (в градациях красного, зеленого, синего цветов), но и выполнение моделирования по разработанным нами алгоритмам.

В свою очередь, широкое комбинирование разных снимков, например, с радарной системой наблюдений дистанционного зондирования, которая основана на микроволновом излучении, повышает информативность материала в геологических исследованиях. Обработка радиолокационной интерферометрии направлена не только на восстановление модели рельефа местности, но и выявление особенностей строения приповерхностных структур. Интерпретацию мультиспектральных снимков следует выполнять в несколько этапов, используя стандартный и дополнительный графы.

Первый этап – информационный. Выбор космического аппарата, получение исходных архивных данных покрытия земной поверхности инфракрасной и радарной съемками в заданных рамках участка. В этом случае выдвигается ряд условий к подбору тепловых снимков.

- Разновременные тепловые снимки (*осень–лето, день–ночь*) увязывают по географическим координатам, которые должны выглядеть как единое целое (*уровень сигнала и частотный диапазон*). Составление мозаики из снимков не допустимо. Одна сцена позволит добиться достоверной оценки природы осадочных пород.
- Устанавливают качество снимков во всех спектральных диапазонах: размер покрытия, пространственное разрешение, границы цифрового диапазона. Изображение не должно содержать сильных шумовых помех.
- С целью минимизации помех снимок не должен содержать высоких по контрастности объектов, обязан иметь максимально возможное число градаций цифрового диапазона. Для этого проводят процесс контрастирования.
- Тепловизионная информация должна заполнять всю площадь обрабатываемого цифрового изображения.
- В случае сильного перепада рельефа местности выполняют топографическую нормализацию снимков.

Если не удастся привести снимок в соответствие с требованиями, он отбраковывается и не принимается к дальнейшей обработке.

На основе радарных данных получают высокоточную цифровую модель рельефа. Строят серию карт – теневых моделей рельефа, с различными азимутами расположения освещенности. Визуальное дешифрирование позволяет подчеркнуть тектонику крупных структур. Следует учитывать, что небольшое пространственное разрешение цифровой модели местности дает меньшую точность, но обработка данных упрощается.

Второй этап – аналитический. Стандартная комбинация, при которой создается композиция натуральных цветов. Конечные цвета (*оттенок цвета – яркость – насыщенность*) не имеют физического значения, но увязываются с природными явлениями и процессами в среде. Процедура предварительной обработки материала во многом стандартная и включает анализ комбинированных данных. Районирование участка предполагает решение геологической задачи, отслеживание сложности морфологического строения (реки, горы, растительность, техногенная нагрузка), а также устойчивых отраженных сигналов. В случае низкой ин-

формативности снимков искусственно проводят уменьшение цифрового сигнала пикселя путем математической интерполяции специального вида функциями. Затем полученное изображение с равномерной дискретизацией заменяется и осуществляется преобразование. Правильность считывания значений в процессе обработки выполняют по первому слою. Процедуру целесообразно реализовывать для изучения детального участка ограниченных размеров.

По существу, основные методические приемы, заложенные в алгоритмах обработки тепловых снимков, переносятся на высокочастотную часть спектра. С той лишь разницей, что физические модели, на которых базируется экспериментальные исследования, нами рассматриваются из двух составляющих энергии экзогенного отраженного потока и поглощенного. Последнее излучение, проникая в верхнюю часть разреза, превращается в эндогенное тепловое поле чехла. Интенсивность и направление потока зависят от свойств пород на поверхности. В составе математических преобразований снимков включена свертка результирующего сигнала по исходному полю, корреляция для надежного обнаружения полезного сигнала, фильтрация, псевдотонирование и выравнивание освещенности изображений. Особенности данного подхода к моделированию заключаются в высокой селективности при разделении сложных полей.

Третий этап – интерпретационный. Тематическая обработка основных расчетных индексов (*показателей*), которые вычисляются по набору алгоритмов и инструментов для проведения спектрального анализа. Алгоритм, основанный на формализации ряда процедур, способен обеспечить с высокой степенью надежности и точности геометризацию геофизических данных. Расчет локальной составляющей теплового поля блоково-разломных структур с установлением оси однородности (*гомогенность*) плотных структур и линеаментов (*разлом*) проводится по снимкам всех частотных диапазонов. Фильтрация мелких деталей в результате генерализации изображения способствует объединению разрозненных фрагментов в единое целое путем введения поправок. Это направлено на прогнозирование и локализацию в пространстве целевых геологических неоднородностей (рудных залежей, зон трещиноватости, крупных разломов, кимберлитовых трубок, контактовых зон интрузии).

По информационным признакам делается заключение о физическом строении среды. Анализ позволяет установить специфику геологической обстановки образования залежей и разработать критерии прогнозирования месторождений; уточнить границы области аккумуляции полезных ископаемых и возможности метода тепловизионного зондирования при оценке слабоизученных районов на основе определения формационной принадлежности; обосновать вероятность выявления новых типов залежей. Наличие различных разломов могут определить положение осевых частей палеорусел, что позволяет вести оценку погребенных зон минерализации.

Космическая тепловизионная томография позволяет получить уникальный геофизический материал. Важность заключена в цветовых оттенках и переходах, четкости линий и мелких деталях. На основе выполняемой классификации композитного изображения с привязкой глубинных зон создается геофизическая карта, отражающая выходы горных пород на дневную поверхность, устанавливающие связь и природу структур. Поэтому, как правило, рассматривают пространственные и временные характеристики неоднородного электромагнитного поля излучения через дифференциально-нормированный параметр и поле корреляции.

Связь между площадными данными или сечениями $x(h)$ можно описать моделью вида $MY = \eta(X, \beta)$, где Y – зависимая переменная ТП; M – оператор математического ожидания; $X = (x_0, x_1, \dots, x_{p-1})$ – матрица независимых переменных (измеренных координат, их произведений или других комбинаций), которые меняются в некоторой области пространства R ; $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1})^T$ – вектор неизвестных параметров, определяемых по результатам экспериментов. Для реального описания применяется модель

$$\varphi(x, h) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos mx + S_{nm} \sin mx) P_{nm}(\cos h),$$

где x и h воспринимаются как данные в радианной мере.

Модель обработки данных в АРМ-подходе представляет вид $Y = X\beta + \varepsilon$ [13]. Относительно стандартной методологии метода наименьших квадратов в развиваемом системном АРМ-подходе при обработке данных выполняют оценку адекватности модели наблюдениям и поиск ее оптимальной структуры.

Природу рудоконтролирующих структур устанавливают по выделенным признакам спектральных характеристик, путем создания и пополнения уже существующих информационных библиотек. В соответствии с этим можно говорить о возможности широкого применения изложенной технологии в различных геологических условиях. Одним из примеров комплексирования данных с целью извлечения скейлинговой информации о среде послужил экспериментальный материал мелкомасштабного прогнозирования месторождений золота и кимберлитового поля в Гвинее.

Оптические свойства растительного покрова. Они определяются особенностями взаимодействия листьев и потока солнечного излучения [44]. В зависимости от длины волны растения имеют различную способность отражения, пропускания и поглощения [84]. В видимом и ближнем диапазонах оптического спектра ИК излучения растительного покрова полностью определяется отраженной энергией Солнца; в среднем (*начиная с 3,5 мкм*) и дальнем ИК – собственным тепловым излучением.

Несмотря на некоторые различия в спектральных характеристиках, свойственных отдельным растениям, все они в период вегетации подчиняются одинаковым закономерностям и описываются похожими кривыми. Для растительности характерны несколько участков высокого поглощения, обусловленных наличием в листовых тканях хлорофилла и других пигментов (*0,4–0,48; 0,6–0,7 мкм*), а также молекул воды (*около 1,45; 1,95 и 2,7 мкм*) [96]. Наиболее высокое поглощение падающей радиации наблюдается в среднем и дальнем ИК диапазонах, благодаря чему зеленые листья являются практически черным телом [49].

Наиболее значительный максимум отражения, определяемый внутренней структурой тканей листьев, располагается в интервале длин волн *0,75 – 1,3 мкм*. В коротковолновой части ИК спектра вне полос поглощения водой отражение также довольно высокое. Небольшое повышение отражательной способности, которым объясняется зеленый цвет здоровой листвы, находится в интервале длин волн *0,54–0,58 мкм*. В течение всего вегетационного периода содержание пигментов в растениях изменяется, что соответствующим образом сказывается на отражательной способности.

По мере развития растений происходит уменьшение отражательной способности в видимой области спектра, вызванное увеличением содержания хлорофилла. В ближнем ИК диапазоне отражение, напротив, растет, так как увеличивается количество межклеточных воздушных пространств в мезофилле листа. В коротковолновом участке ИК спектра усиливается поглощение радиации водой, содержащейся в листве. Во второй половине развития, по мере увядания растительности, наблюдается увеличение отражательной способности в видимом диапазоне, что вызвано разрушением хлорофилла. При этом каротиноиды по-прежнему обеспечивают сильное поглощение в сине-голубом спектре. Поэтому осенью растения приобретают желтую окраску. В ближнем ИК интервале отражение уменьшается из-за разрушения внутренней структуры листьев и потери ими влаги.

У растений, находящихся в неблагоприятных экологических условиях, в спектре отражения происходят изменения, схожие с временными изменениями в конечные периоды развития. Так, например, у заболевших или пораженных вредителями деревьев наблюдаются повышенные значения спектральной яркости почти во всей видимой области спектра. Значительное влияние на отражательную способность оказывает избыток или недостаток в почве микроэлементов, вызывающих хлороз растений (например, при повышенном содержании тяжелых металлов в пределах рудных месторождений). Хлороз приводит к разрушению хлорофилла и побурению листьев. Для таких растений характерно отсутствие максимума отражения в зеленой зоне спектра [96]. В районах залежей нефти и газа углеводороды, мигрирующие к дневной поверхности, вызывают изменение количества каротиноидов в растениях. Это приводит к увеличению отражательной способности в синем участке спектра и изменению окраски листьев (эффект голубого сдвига). В ближнем ИК диапазоне, по сравнению с нормальными растениями, у «стрессовых» наблюдается постепенное снижение отражения.

Информационный материал получают путем обработки космической съемки (*Landsat-TM/ETM+*) спектральной яркости исследуемой территории, в диапазонах видимого (0,63–0,68 мкм) спектра, ближнего (0,76–0,90 мкм), среднего (1,55–1,75 мкм) и дальнего (10,3–12,5 мкм) инфракрасного интервала длин волн. Для этого широко применяется технология интер-

претации спектрзональных данных. Дополнительно для каждого пикселя снимка вычисляют индикаторы физиологического и текстурного состояния почвенно-растительного покрова следующим способом.

Нормализованный спектральный индекс «стресса» растительности подсчитывается на основе линейной трансформации данных по формуле:

$$ISN = \frac{IS - Me + q\sigma}{2q\sigma},$$

где Me – медиана, σ – среднеквадратичное отклонение, q – коэффициент, зависящий от ширины гистограммы значений индекса

$$IS = \frac{T_R}{100 \times TVI},$$

T_R – радиационная температура (в градусах Цельсия), полученная по данным дальнего инфракрасного спектрального канала TM_6 (10.4–12.5 мкм),

$$TVI = \sqrt{\frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3} + 0,5},$$

– трансформированный вегетационный индекс, отражающий относительное содержание хлорофилла в биомассе [139]. TM_3 значение спектральной яркости в красной области спектра, расположенной в зоне сильного поглощения хлорофилла, TM_4 – значение спектральной яркости в ближней (0.76–0.90 мкм) ИК области, чувствительной к количеству вегетационной биомассы.

Индекс IS является универсальным, интегральным индикатором водно-теплового стресса растительных ландшафтов. Повышенные величины IS свидетельствуют о большей вероятности присутствия на исследуемой территории аномального состояния растительности. Этот индекс более эффективен, чем применение по отдельности его составляющих T_R и TVI , так как максимально полно отражает основные признаки угнетенного состояния фитоценозов – понижение значений вегетационного индекса и повышение температуры.

Диапазон значений параметра IS для участков ландшафта при разных датах съемки *Landsat-TM/ETM+* может существенно различаться, что обусловлено неодинаковыми температурными метеорологическими условиями и несовпадением фаз вегетации. В связи с этим используют

нормализованный индекс «стресса». Диапазон изменения ISN для ландшафтно-растительных систем находится в пределах от 0 до 1 (за исключением воды, техногенных объектов, открытых горных пород), а значение медианы нормализованной гистограммы располагается в пределах 0,5. Путем подбора коэффициентов q учитывается различная дисперсия гистограмм IS, вызванная разнообразием растительных ландшафтов и изменчивостью их состояний.

Нормализованный инфракрасный индекс состояния растительности и почвы подсчитывается по формуле:

$$IWN = \frac{IW - Me + q\sigma}{2q\sigma}, \quad \text{где} \quad IW = \frac{T_R}{100 \times TWI} \quad \text{и} \quad TWI = \sqrt{\frac{TM_4 - TM_5}{TM_4 + TM_5}} + 0,5$$

– трансформированный индекс «влагосодержания», TM_5 – значение спектральной яркости в средней (1.55–1.75 мкм) ИК области, чувствительной к содержанию влаги в растительности и почвах.

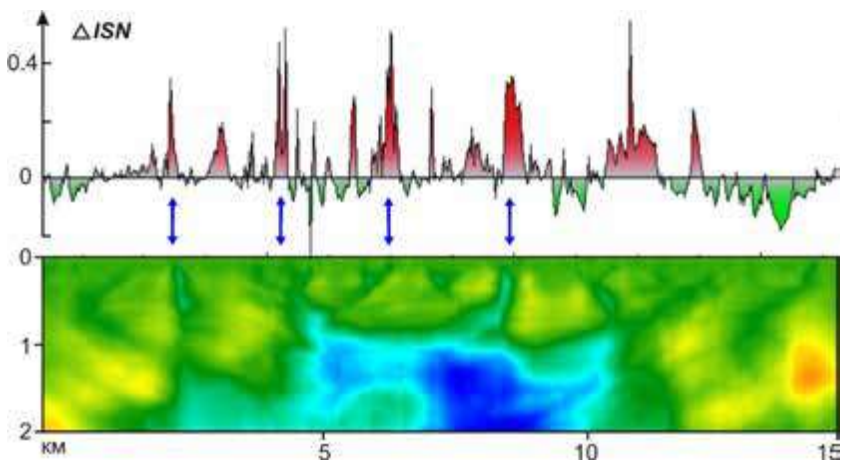


Рис. 2.13. Зависимость индекса «стресса» растительности ISN от строения блоково-разломных структур Самотлорского месторождения углеводородов (Россия)

Предлагаемый способ основан на извлечении комплексной информации о пространственной и временной динамике спектральных параметров состояния растительности и почвы (ISN, IWN) в увязке с глубин-

ным строением геологической среды. При этом глубинные тектонические нарушения Земли рассматриваются как система природных подводящих каналов для миграции к поверхности флюидных и газовых эманаций, которые образуют участки перетоков флюидов в проницаемых средах и их накопления в пористых средах в форме многоэтажных камер. Возникающие зоны разуплотнения пород с улучшенными свойствами коллекторов способны быть природными резервуарами воды и растворенных углеводородов (рис.2.13). Состояние почвенно-растительного покрова, определяемое путем спектральной съемки, дает дополнительную геохимическую информацию, которая отражает аномальное воздействие углеводородов и подземных вод на верхнюю часть разреза.

В ходе длительной разработки месторождения углеводородов нарушается естественное равновесное состояние геологической среды, в которой находится нефтегазовая залежь, формировавшаяся в течение многих миллионов лет. Возникает ситуация, при которой легкие углеводороды по зонам латеральной трещиноватости среды и крупным вертикальным разломам устремляются в верхнюю часть разреза. Изменяется не только структура флюидов, заполняющих трещины и разуплотнения горных пород и устремляющиеся к дневной поверхности за счет перепада давления, но и плотность потока теплового излучения среды. Это отражается на характере развития растений, так как растворенные углеводороды оказывают негативное воздействие на их корни. В результате можно выделить три степени изменчивости растительного покрова за счет отсутствия (*нормальная*), незначительного и сильного (*аномальная*) влияний эндогенного процесса. Поэтому, проводя сопоставление установленных аномальных участков нормализованного индекса стрессового состояния растительности (*высокие значения ISN*) с особенностями глубинного строения, можно выделить наиболее вероятные пути миграции по зонам разломов углеводородов (*синие стрелочки*) и глубинных вод к дневной поверхности.

Следует отметить, что там, где флюиды не «заражены» легкими или тяжелыми фракциями углеводородов, растительность находится в нормальном неугнетенном состоянии. В тех местах, где наблюдается высокая корреляция аномального поведения индекса ISN и выходов УВ, распространяющихся с глубин залегания продуктивных горизонтов до дневной

поверхности, велика вероятность экологического нарушения природной среды за счет антропогенного воздействия.

В результате можно получить следующую достоверную информацию для принятия обоснованных и экономичных решений: карты районирования подземных вод и гидротермальных источников с целью обеспечения экологическими чистыми энергетическими источниками для жизнедеятельности населения; схемы прогнозов с ранжированием экологической ситуации по отдельным участкам с предоставлением соответствующих рекомендаций к дальнейшим изыскательским работам; электронный паспорт геофизической информации по каждому объекту изысканий, который направлен на освещение инженерно-геологических факторов.

2.7. Программный комплекс и тестирование на синтетических моделях

Программный комплекс «ThermolmageProcessing v3.0», разработанный в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языках C++ и C#, предназначен для работы в ОС Windows XP, 2003, Vista (рис.2.14). Перечислим достоинства предлагаемой технологии, с точки зрения конкурентной способности:

- проработанные алгоритмический аппарат и методика обработки позволяют восстанавливать эффективные значения потока теплового излучения и увязывать его как с петрофизическими свойствами среды, так и с насыщенностью пласта водой или углеводородами;
- ориентация на комплексный подход, позволяющий вести восстановление динамических параметров среды в рамках одного технологического графа;
- гибкость архитектуры пакета, позволяющая не только вести обработку данных, полученных при самых различных схемах наблюдений, но и интегрировать разнородные результаты;
- отлаженный технологический граф, позволяющий проведение полного цикла исследований – начиная от редакции космических снимков и кончая геологической интерпретацией;

- поддержка основных типов данных (*растровых, векторных и Grid*) в обработке, расчетах и преобразованиях; изменение палитры цветов изображения или представления в серых тонах карт и разрезов. Цветовая коррекция включает контрастирование, изменение яркости и цветовой гаммы изображения.



Рис. 2.14. Схема обработки космических спектрозональных тепловизионных снимков

При решении обратной задачи проводится пересчет объемной матрицы значений теплового поля в абсолютные отметки. Геометрическое ре-

дуцирование поля целесообразно проводить в том случае, если площадь исследований имеет значительный перепад высот на местности. При слабом изменении рельефа введение поправки не проводится, что не снижает практическую эффективность тепловизионного зондирования. В общем случае поставленную проблему целесообразно решать на этапе построения разреза и интерпретации теплового поля.

Комплекс производит расчет теплового поля на основе космических, авиационных и наземных снимков, представленных в основных графических форматах. Он позволяет визуализировать результаты обработки в виде горизонтальных срезов, вертикальных разрезов и их дифференциальных характеристик. В качестве исходных данных используются тепловизионные снимки в распространенных графических (*BMP, TIFF*) или текстовых форматах. Программный комплекс позволяет на основе одного снимка построить трехмерную картину теплового поля Земли, горизонтальные и вертикальные срезы на любых рассчитанных глубинах. Имеется возможность производить дифференциальные трансформации как отдельных срезов, так и всего объема данных с визуализацией результатов расчета.

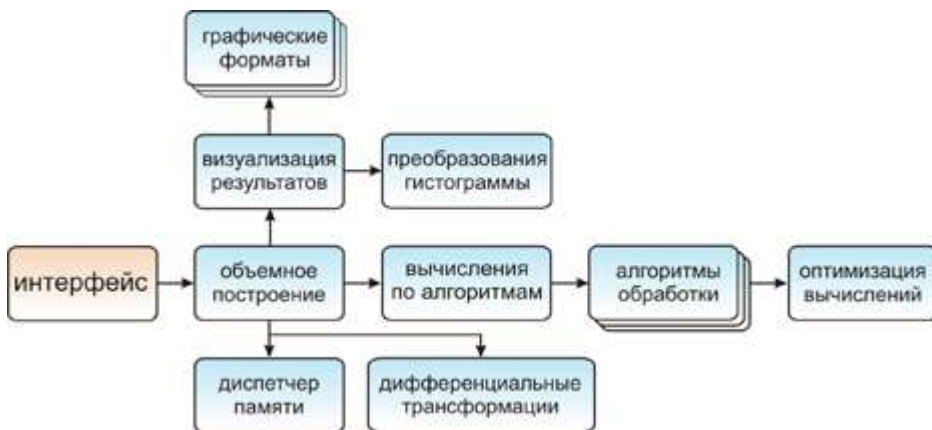


Рис. 2.15. Архитектура программного комплекса

В качестве дополнительных стандартных программных средств рекомендуется использовать ГИС-пакеты для работы с данными дистанционного зондирования. В частности, картографический анализ и создание

отчетов ArcGIS (ESRI), визуализация и обработка привязанных векторных и растровых данных Global Mapper (Blue Marble Geographics), программа обработки цифрового набора данных, моделирование и анализ поверхностей Surfer (Golden Software), графический пакет для обработки векторных изображений Corel DRAW (Corel Corporation) и другие.

Архитектура комплекса представлена на рис.2.15. Она состоит из ряда отдельных модулей, каждый из которых осуществляет собственные расчеты и реализуется в виде динамически подключаемой библиотеки (Dynamic-link library – DLL).

Модульное построение делает систему гибкой и простой в развертывании. Интерфейс пользователя системы позволяет задавать исходные данные для обработки в виде файлов, содержащих тепловые поля в любом из поддерживаемых форматов; алгоритм, по которому предусмотрена обработка материала; предельную глубину, до которой проводятся расчеты; параметры отображения результатов. Программный комплекс предоставляет возможность визуализировать геотермические модели через интерфейс пользователя в двухмерном и трехмерном виде, сохраняя их в графическом файле.

Модуль «Объемные построения» создает трехмерную модель теплового поля. Он же отвечает за порядок построения горизонтальных и вертикальных срезов, а также их дифференциальных трансформаций.

Модуль «Диспетчер памяти» определяет, каким образом хранится объемная модель в памяти компьютера и осуществляет доступ к ней. При необходимости он создает временные файлы для хранения данных на диске.

Модуль «Дифференциальные трансформации» выполняет расчет частных производных различных порядков.

Модуль «Визуализация результатов» отвечает за отображение результатов обработки, а также сохранение их на диске в заданном формате.

Модуль «Преобразования гистограммы» обеспечивает различные функции изменения характеристик изображения для его более качественного отображения.

Работа с файлами разнообразных графических форматов реализована путем создания нескольких типовых модулей, каждый из которых преобразует свой тип исходных данных. Такой подход позволяет легко

наращивать число обрабатываемых форматов без перекомпиляции системы. Модули работы с изображениями обеспечивают сохранение на диске результатов вычислений в виде графических файлов.

Модуль «Вычисления по алгоритмам» обеспечивает загрузку модуля обработки в зависимости от выбранного алгоритма и создает набор слоев для дальнейшего построения объемной модели.

Модули обработки выполняют построения моделей теплового поля по различным алгоритмам. Возможность нескольких видов расчета реализована аналогично работе с графическими форматами.

Модуль «Оптимизация вычислений» предназначен для ускорения выполнения операций, наиболее часто встречающихся в алгоритмах обработки.

Для удобного представления трехмерного массива результатов обработки используются двухмерные изображения. Наиболее наглядно такую модель представляют горизонтальные слои на заданных глубинах и вертикальные разрезы по определенным профилям.

Пусть $S = \{m_{ijn}\}$, где $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, K}$, $n = \overline{1, N}$ – множество результатов обработки. Тогда слоем на глубине n является множество $L \subset S$, $L = \{m_{ijn}\}$, где $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, K}$. Разрезом является множество $R \subset S$, $R = \{m_{ijn}\}$, где $j = F(i)$, $n = \overline{1, N}$. Из определений видно, что для построения слоя достаточно получить все значения из массива результатов на одной глубине и представить их в виде графического файла.

Для построения разреза необходимо получить значения массива результатов на всех глубинах, координаты i и j которых удовлетворяют условию $j = F(i)$. В данном случае функция $F(i)$ задает вертикальный разрез. Он представляется, так же как и слой, в виде графического файла.

В силу ряда причин вертикальные разрезы не всегда несут достаточно информации о глубинном строении объектов. Для увеличения информативности результатов используются дифференциальные трансформации. В их число входит вычисление первой и второй частных производных.

Известно, что первой производной функции f в точке x_0 называется величина

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} .$$

Но в данном случае объемная модель представлена дискретным множеством точек, а значит

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} .$$

Вторая производная для дискретного случая

$$f''(x_0) \approx \frac{f'(x_1) - f'(x_0)}{x_1 - x_0} .$$

Модуль дифференциальных трансформаций имеет возможность вычислять производные как первого, так и второго порядков с любым заданным шагом (*разность* $x_1 - x_0$). Визуализация в двухмерном виде предполагает два типа изображений – горизонтальных слоев и вертикальных разрезов.

Результаты обработки хранятся в виде трехмерного массива, что позволяет визуализировать не только отдельные слои, но и строить полноценные 3D образы. Программный комплекс имеет возможность демонстрировать данные через интерфейс пользователя, а также записывать их на диск в виде файла какого-либо графического формата. Сохранение осуществляется модулями интерпретации исходных данных. Каждый из них может записывать на диск данные в своем формате.

Для визуализации данные теплового поля могут быть представлены в виде градаций серого цвета. Такой способ позволяет задать до 256 значений, т.е. весь диапазон данных приводится к размерности от 0 до 255. Нулю соответствует черный цвет, 255 – белый. Все остальные значения являются переходными между белым и черным (*градации серого*). Этот способ не очень удобен для визуализации, так как имеет довольно малый диапазон, и при приведении к нему теряется слабая изменчивость значений. Кроме того, наличие аномальных точек со значениями много больше или много меньше среднего приведет к нечитаемости всего изображения.

Для расширения диапазона визуализируемых значений рекомендуется использовать цветные изображения. В этом случае теоретически возможно задать до 16 миллионов значений. Но тепловое поле, показанное таким образом, будет трудно восприниматься специалистом. Для построения читаемого изображения следует использовать палитру. В этом

случае результирующее значение пикселя $p=P(r)$, где r – рассчитанное значение поля, а функция P задает определенную палитру. Этот подход позволяет задать от сотен до нескольких тысяч значений.

Для улучшения визуализации можно использовать видоизменение гистограммы изображения. Гистограммой цифрового изображения с уровнями яркости в диапазоне $[0, L-1]$ называется дискретная функция $h(r_k)=n_k$, где r_k есть k -й уровень яркости, а n_k – число пикселей на изображении, имеющих яркость r_k [21]. Важно отметить, что распределение значений элементов, близкое к равномерному изображению, занимая весь диапазон возможных значений яркости, будет выглядеть высококонтрастным и содержать большое количество полутонов. Для повышения качества результатов желательно использовать такую функцию преобразования, которая позволит автоматически добиваться такого эффекта.

Представленным требованиям удовлетворяет преобразование, называемое эквализацией гистограммы. Она проводится по формуле:

$$S_k = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad k = \overline{0, L-1} \quad ,$$

где n – общее число пикселей на изображении.

Таким образом, выходное изображение получается отображением каждого пикселя входного изображения, имеющего яркость r_k , в соответствующий элемент выходного изображения со значением S_k .

Разработанный программный комплекс позволяет формировать изображения, представленные градациями серого тона, использовать различные цветовые палитры, проводить эквализацию гистограмм.

Временные характеристики построения объемных моделей. Общее время работы программного комплекса является суммой времен на отдельные операции: $T_{общ} = T_{исх} + T_n + NT_{обр} + S(T_c + T_{cc}) + P(T_p + T_{cp} + T_{\partial} + T_{cd})$, где $T_{общ}$ – общее время работы комплекса, $T_{исх}$ – время на считывание исходной информации, T_n – время на выделение памяти для модели, $T_{обр}$ – время на расчет одного слоя, T_c – время на получение слоя из объемной модели, T_{cc} – время на сохранение слоя, T_p – время на получение разреза из объемной модели, T_{cp} – время на сохранение разреза, T_{∂} – время на дифференциальную трансформацию разреза, T_{cd} – время

на сохранение дифференциальной трансформации разреза, N – число слоев модели, S – число слоев, которые необходимо сохранить, P – число разрезов, которые необходимо сохранить.

Время $T_{исх}$ зависит от операций, выполняемых в модулях графических форматов, и может быть записано в виде $T_{исх} = M K t_{счит}$, где M – ширина тепловизионного снимка, K – высота тепловизионного снимка, $t_{счит}$ – время на считывание одного элемента тепловизионного снимка.

Время $T_n = M K N t_n$ зависит от операций, выполняемых в диспетчере памяти, где t_n – время выделение памяти для одного элемента модели.

Время $T_{обр} = n^2 t_{\phi} + n^2 M K t_{св}$ зависит от операций, выполняемых в модулях обработки, где n – глубина, на которой строится слой, t_{ϕ} – время на вычисление элемента фильтра, $t_{св}$ – время вычисление элемента свертки. В данном выражении первое слагаемое представляет собой время на вычисление фильтра в зависимости от глубины, второе – время на свертку фильтра с изображением.

Времена $T_c = M K t_{пол}$ и $T_p = D N t_{пол}$ определяются операциями, выполняемыми в модуле объемных построений, где $t_{пол}$ – время на получение элемента массива, D – длина разреза в элементах массива.

Время $T_{\delta} = D N t_{\delta}$ зависит от операций, выполняемых в модуле дифференциальных трансформаций, где t_{δ} – время на выполнения элементарной операции дифференциальной трансформации.

Времена $T_{cc} = M K t_{соxp}$ и $T_{cp} = T_{cd} = D N t_{соxp}$ определяются операциями, выполняемыми в модулях преобразования гистограммы и графических форматов, где $t_{соxp}$ – время на сохранение единичного элемента массива.

Из приведенных выражений видно, что $T_{исх}$, T_n , T_c , T_p , T_{δ} , T_{cc} , T_{cp} и T_{cd} имеют прямую зависимость от размерности модели и разреза. Времена $t_{счит}$, t_n , $t_{пол}$, t_{δ} и $t_{соxp}$ зависят только от аппаратной составляющей комплекса и могут быть уменьшены лишь путем улучшения ее технических характеристик. Значит, строение комплекса в данной части следует признать оптимальным относительно быстродействия. Дальнейшая оптимизация данной части комплекса может проводиться только для уменьшения времен t_{ϕ} и $t_{св}$. Оно может быть достигнуто не только путем

улучшения технических характеристик аппаратной части комплекса, но и путем оптимизации расчетов фильтра и свертки. Но данные методы являются индивидуальными для каждого отдельного алгоритма.

Анализ методических погрешностей на синтетических моделях. Оценка устойчивости работы алгоритма и тестирование программного комплекса проводилась на основе инверсии теплового поля, получаемого путем решения прямой задачи от объектов простой геометрической формы с использованием программы Comsol Multiphysics 4.0 (FEMLab). Целью тестирования программы является определение кластера моделей сред, которые с допустимой погрешностью восстанавливаются предлагаемым алгоритмом. В качестве трехмерных моделей с учетом простоты их расчета и дальнейшего преобразования приняты разные виды шарообразных высокотемпературных точечных источников, находящихся в изотропной среде. Нарращивание количественного состава источников отражает усложнения моделей среды.

Модель 1. В первой модели рассматривается тепловое поле, созданное одиночным сферическим объектом в однородной среде. В этом случае физическая модель среды представляет собой металлическое шарообразное тело радиусом 0,5 м, расположенное на глубине 2 м в мощном слое глинистых пород. За исходные данные при моделировании поля приняты температуры 350K шара и 293K атмосферы. Следовательно, положительное приращение значений температур шара и вмещающей среды, должно дать высокотемпературную аномалию над рассматриваемым объектом.

Последующее решение обратной задачи по алгоритму Гаусса с использованием двумерного распределения теплового поля для дневной поверхности обозначает место шара одним экстремумом положительной аномалии. Четко вырисовывается верхняя граница объекта и геометрия. К недостаткам в расчетах относится неясная, размытая нижняя граница шарообразного тела. По дифференциальной характеристике ТП ее центр совпадает по глубине с местоположением синтетической модели. Разрез, построенный по второй производной ТП, содержит шарообразную форму аномалии, которая незначительно смещена относительно исходной модели.

Точность прогнозирования одиночного сферического объекта составила: по глубине до центра шара 0,05 м или 1,2 %, в плане – 0,05 м (0,5 %), по температуре – в 3,6 К или 6,9%. Средняя погрешность в оценке положения различно расположенных точечных источников ТП в однородной среде, как правило, сохраняется.

Модель 2. Во второй модели (рис.2.16) рассматривается тепловое поле, создаваемое двумя сферическими объектами, расположенными на одной глубине, в однородной среде. Тепловые свойства вмещающей среды и объектов приняты, как в модели 1. В этом случае два шарообразных тела в толще глины дают две положительные температурные аномалии одной интенсивности, а результирующее поле является суммой полей, создаваемых объектами в отдельности. Разделение источников аномалий в пространстве проведено на основе фильтрации изображения по алгоритму Гаусса и блоково-разломных структур.

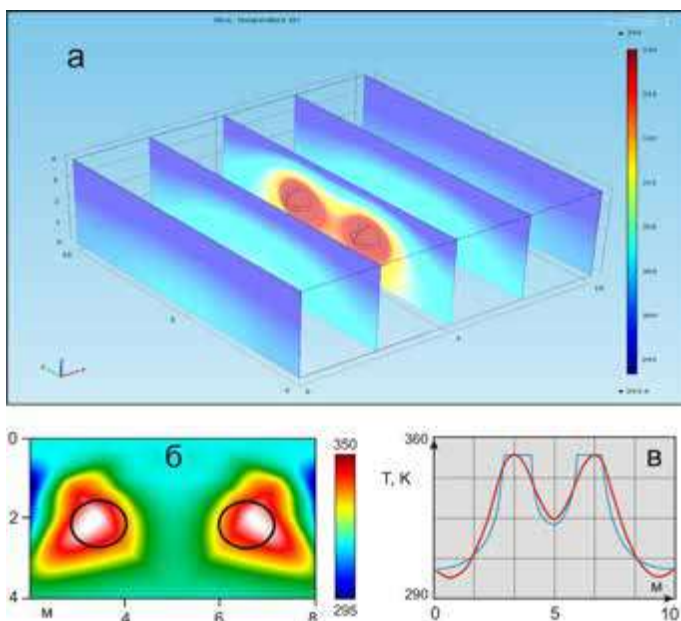


Рис. 2.16. Модель теплового поля, создаваемая двумя шарообразными объектами в однородной среде: объемное представление объектов (а), блоково-разломная структура (б), графики ТП на глубине источника (в) при решении прямой и обратной задач.

По результатам обработки изображений в разрезе на месте шаров проявляются высокотемпературные аномалии, разделенные между собой низкими значениями поля. На первой производной их центры совпадают с исходной моделью по глубине и местоположению. Следовательно, основные особенности теплового поля сохраняют свое поведение: поле дифференцировано, объекты четко разделяются между собой, имеют явную шарообразную форму и верхние границы. При этом средняя погрешность горизонтального распределения температур оценивается в 8,2% или 3,8 К. Ошибка нахождения центра левого и правого объектов по глубине составляет 1,2% (0,05 м), а по горизонтальному расположению – 0,5% (0,05 м).

Модель 3. Рассматривается случай, когда объекты разнесены по глубине, и это отражается на величине теплового поля. Более глубокий объект создает слабое поле и неявно проявляется на тепловизионном изображении. Из построенной объемной модели следует, что верхний сферический объект выделяется наиболее четко, а нижний – значительно слабее, кроме того, имеет незначительно искаженную форму. Очевидно, что это обусловлено влиянием на получаемый тепловизионный снимок более сильного сигнала от верхнего объекта. Погрешность определения центра объектов по глубине: верхнего – 1,2% (0,05 м) и нижнего – 7,5% (0,3 м), а по горизонтальному расположению: верхнего – 0,5% (0,05 м), нижнего – 2,5% (0,25 м).

Таким образом, от тел сферической формы на поверхности создаются четкие интенсивные аномалии, характерные для потенциального поля, что указывает на возможность определения геометрии объекта, используя эмпирические зависимости при решении прямой задачи. Решение обратной задачи доказывает, что от тел различной геометрии и интенсивности источника объект восстанавливается в разрезе с погрешностью не более 3%.

Для проверки устойчивости модели к аддитивному случайному шуму к ТП, смоделированному путем решения прямой задачи теплопроводности для шарообразных объектов, с наложением гауссовского шума различной мощности (рис.2.17). В процессе исследования выявлено, что с соотношением сигнал/шум до 30% погрешность определения центра объекта не превышает 10% по глубине.

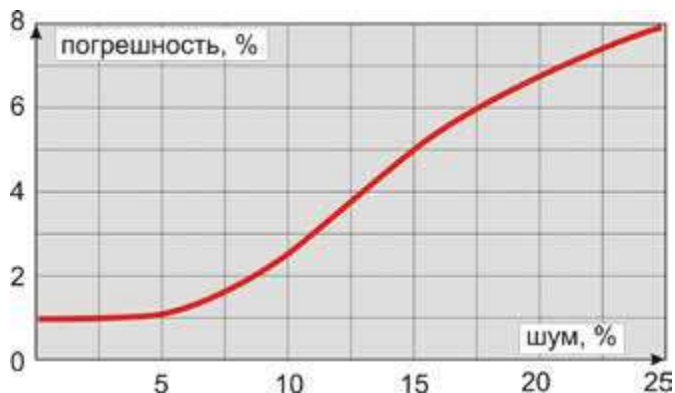


Рис. 2.17. Связь погрешности нахождения центра объекта от уровня гауссовского шума

При увеличении шума с соотношением более 30% в модели начинают проявляться ложные аномалии, не связанные с поверхностью, которые могут быть интерпретированы как объекты. Аномалии, создаваемые реальными объектами, не имеют ярко выраженных максимумов, что делает невозможным локализацию центров объектов.

Моделирование реальных стационарных геологических объектов в виде неоднородностей осадочного чехла, выступов поверхности кристаллического фундамента, напоминающие по форме структуры горст и грабен, тектонических нарушений позволяет оценить прикладное значение тепловизионного зондирования. Это наглядно демонстрирует разрешающую способность метода при решении обратной задачи, с оценкой средней погрешности в построении геометрических образов природных объектов.

Сезонность и время наблюдений. Самое оптимальное время тепловых съемок – поздняя осень до выпадения снега. В этот период отсутствует экранирующее влияние растительного покрова и тепловые контрасты объекта и фона незначительно зависят от Солнца.

Для контроля повторяемости результатов моделирования сравнивались модели в зависимости от сезонности снимка, построенные по осеннему снимку, и моделями по весеннему, летнему и зимнему. Среднее расхождение моделей составило для весеннего снимка – 16,7%, для летнего

снимка – 14%, для зимнего снимка – 10,9%. Расхождение между моделями незначительно нарастает с глубиной, не превосходя 22% (рис.2.18 а). Таким образом, в случае отсутствия осенних снимков по региону можно использовать изображения, полученные в другие периоды съемки. Наиболее предпочтительным является зимний снимок, наименее предпочтительным – весенний снимок.

Наилучшие результаты при построении объемных моделей теплового поля Земли достигаются с использованием снимков, сделанных в ночное время, когда величина тепловых неоднородностей земной поверхности минимальна. В случае невозможности получения ночных снимков рекомендуется использовать снимки, сделанные ранним утром, когда температурные помехи за счет солнечного нагрева невелики.

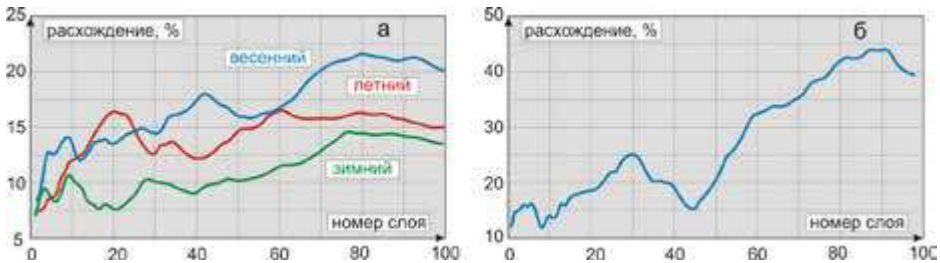


Рис. 2.18. Зависимость расхождения моделей от глубины для сезонных снимков (а), дневного и ночного снимков (б)

Для проверки повторяемости результатов моделирования в зависимости от времени съемки сравнивались модели, построенные по ночным и дневным тепловизионным снимкам (рис.2.18б). Среднее расхождение между ними составило 27,3%. Расхождение между двумя моделями быстро нарастает с глубиной и доходит до 45% в районе девяностого слоя. Таким образом, сравнение тепловых моделей показало, что влияние Солнечного излучения существенно влияет на параметры модели. Поэтому для изучения глубинного строения Земли необходимо применять только ночные снимки. Использование дневных снимков возможно только для изучения небольших глубин (до пятидесятого слоя), где расхождение не превышает 20%.

2.8. Электронный паспорт геофизического объекта

Программа «PasportReader-v.3.0» направлена на формирование результатов тепловизионного зондирования и оперативного просмотра графических модулей в электронном виде. Она состоит из приложений, предназначенных для просмотра данных (*представленных в виде Word-документа*) и визуализации иллюстраций (*файла-изображения*). Графические документы показаны в виде неполного имени, имеющего различные форматы расширения (*bmp, tiff, jpeg, srf и другие*). Это позволяет открыть паспорт программой MS Word в режиме просмотра без возможности его редактирования (*отсутствуют какие-либо команды управления*). Дополнительная обработка с выдачей на печать материалов графических файлов форматов *bmp, tiff, jpeg* проводится путем импортирования в графические редакторы *CorelDraw* и *Surfer* с расширением *srf*. Закрытие всех файлов и сервисных программ происходит при выходе из программы «PasportReader-v.3.0», которая действует под управлением операционной системы Windows. Блок-схема подготовки и использования комплекса приведена на рис.2.19.

Созданный паспорт соответствует определенной структуре входных и выходных каталогов с включением ряда директорий аналогичных данных. Природный объект содержит папки результатов геофизических работ в виде съемок космической (*тип и прибор спутника, использованное пространственное разрешение*), авиационной (*вертолет, дирижабль*) и инструментальной наземной (*тоннель, шахта, техногенные объекты*). В каталог входят исчерпывающие исходные информационные материалы изучаемого объекта, начиная с описания типа тепловизионной съемки, местоположения площади, методики и техники наблюдений.

Организация файлов видимых и спектрозональных инфракрасных снимков содержит граф преобразованных исходных данных, географическую привязку участка с нанесением местоположения профилей. В результате стандартной обработки тепловизионных данных по программе «ThermolmageProcessing v3.0» материалы представляются в виде физических моделей геологической среды и результатов их интерпретации. Графические приложения собраны в папки, которые содержат в табличной форме номер и название файла рисунка, номер профиля, глубину срезов, описание объекта. Данные файлы имеют два типа расширения: *во-первых*, для визуальной демонстрации ранее построенных карт и

разрезов, во-вторых, дальнейшей обработки материала в графических редакторах. Путь к файлам относительно объектов показан окнами и их название в директории.

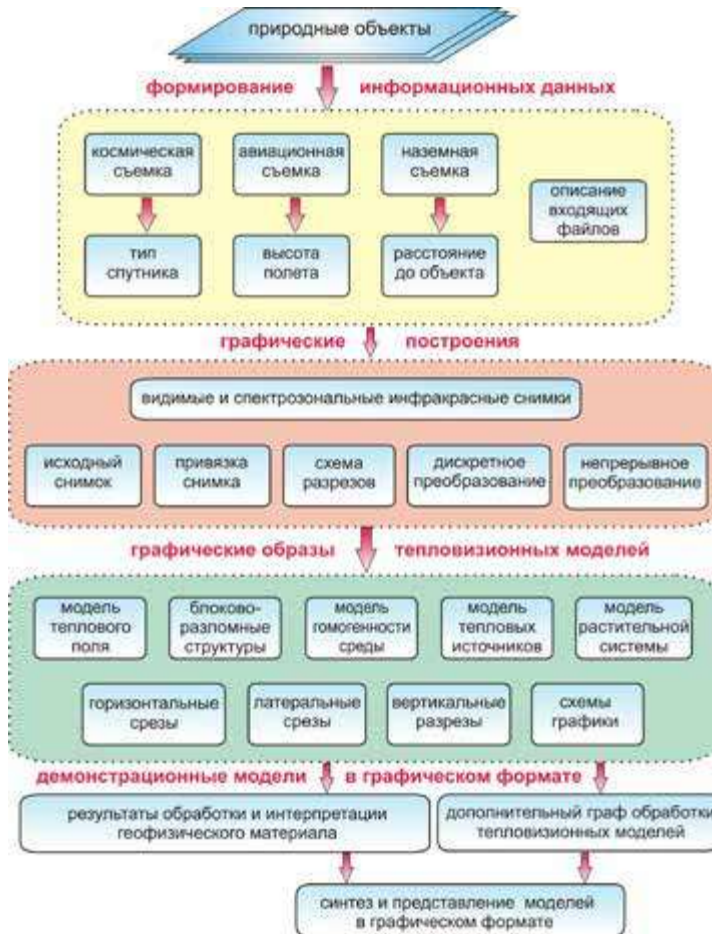
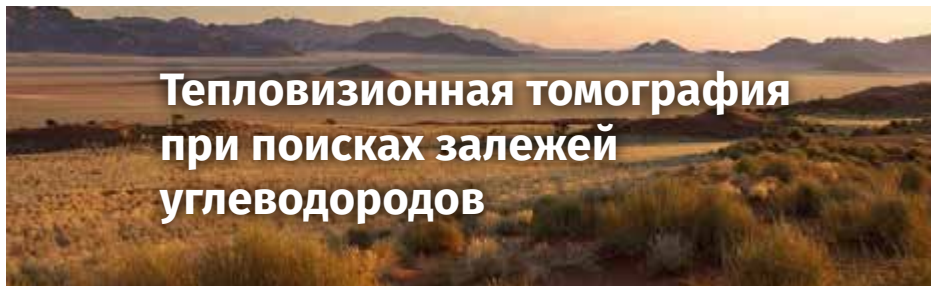


Рис. 2.19. Блок-схема формирования и демонстрации в электронном виде графического геофизического материала

Программное обеспечение по просмотру результатов обработки и интерпретации материалов обращено на поддержку работы исследователя. Оно позволяет сориентироваться в огромном информационном потоке тепловизионной съемки природных и техногенных объектов.



Возникновение нефти: «... Который взрастил зеленые луга, потом подверг их в сухое, потом в черное состояние». (Сура «Аль-Аля», 87:4-5)

وَالَّذِي أَخْرَجَ الْمَرْعَىٰ
فَجَعَلْنَاهُ نَجْءًا آخِوًا

Разломы (трещины): «Клянусь раскалываемой землей!» (Сура «Ат-Тарик», 86:12)

وَالْأَرْضِ كَانَتْ كَصَدَعٍ

3.1. Графические образы структур земной коры

В решении геологических задач на основе ТВТ технологии появляется возможность реализации основного принципиального достоинства космического зондирования, связанного с определением взаимного влияния аномальных объектов и разделением поверхностных и глубинных неоднородностей. Зависимость регистрируемого поля от строения и теплопроводности среды проявляется более наглядно, если эти модели представить в виде составляющих, вычисляемых самостоятельно:

- безразмерного параметра, зависящего от амплитуды наблюдаемого поля и пропорционального плотности блоково-разломных структур;
- размерного параметра, связанного с теплопроводностью среды через плотность эндогенного теплового потока и эквивалентного ему точечного источника.

В этом случае одним из шагов моделирования является преобразование множества построенных слоев ТП в объемную модель блоково-разломных структур. Задача расчета модели сводится к увеличению амплитуды мало интенсивных положительных аномалий при относительном сохранении общего фона теплового поля. Для этого применяем такое преобразование с использованием максимизирующего фильтра

и аналога оператора Лапласа, которое выделяет области с относительно большими значениями элементов снимка. Изображение, полученное с использованием максимизирующего фильтра, позволяет определить участки повышенного ТП, но линии разрывов среды на нем проявляются слабо. Для их выделения используется подход, основанный на минимизирующем фильтре. Составление демонстрационной графики выполняется с применением пороговой фильтрации изображений и построения карт трещиноватости геологической среды. В этом случае сечение или плановая конфигурация локальных зон соответствует тектоническим активным участкам, описание которых адекватно отражает представления о характере строения коры. Сходство морфологических элементов может наблюдаться в различном масштабе, вплоть до регионального подобия. Основы классического подхода морфоструктурного анализа инфракрасного снимка и карт-среза блоково-разломных структур позволяют построить распределение линеаментов в пространстве. Графическое отображение в плане розы-диаграммы указывает на основные направления простираения локальных разломов осадочного чехла и региональных глубинных зон тектонических нарушений.

Детальное исследование региона выполняется по многочисленным спектрально-зональным снимкам с высоким пространственным разрешением. Результативные карты получают путем наложения данных обработки и их физико-математической интерпретации на топографическую основу с добавлением текстовой и графической информации, включая классификацию геологических объектов. В качестве топографической основы используют векторные и растровые электронные карты высокого разрешения.

Эффективные тепловые модели гетерогенных зон относятся к категории двумерных моделей, геометрия которых (*форма, углы наклона*) и размеры (*мощность, протяженность*) могут быть тождественны с геологическим горизонтом. Однако внутренняя структура зон определяется реологическим состоянием неоднородностей, которые условно подразделяются на два вида – зоны с упорядоченной и случайной структурой распределения. По интегральным тепловым характеристикам зоны относятся к однородным и неоднородным моделям, контрастность гетерогенных объектов по отношению к вмещающей среде может изменяться скачко-

образно или плавно. В локальной тонкослоистой модели контрастность зон может быть очень незначительной.

Термодинамические условия контролируют важнейшие тектонические свойства – реологическое состояние веществ [72], что позволяет проводить систематику природных деформаций в реальных средах. О характере горизонтов земной коры судят по общему виду рисунка поля, который позволяет установить различные образы. К примеру, геодинамические зоны сжатия, растяжения и смятия гетерогенных неоднородностей, линейно ориентированные (гряды, разломы) и кольцевые структуры осадочного чехла и фундамента, интрузивные тела, глубинные валообразные блоки, аллохтонные литопластины, астеносферные слои и тектоноферы.

Региональные геотермические этажи – часть разреза теплового поля с характерными размерами и формами геотермических ячеек (*представляя собой холм со штокообразным расширенным основанием, от которого направлены положительные линейные тепловые потоки*), механизмом и скоростью протекающих в них процессов. Анализ ТП, как и любого физического поля Земли, представляется полезным начинать с выделения неоднородностей и иерархической классификации. Формальными критериями разделения неоднородностей ТП являются размеры, форма, контрастность, положение осей аномалий, линии и плоскости, по которым происходит смещение аномалий, вид рисунка исходного поля и его производных, относительно положительное либо отрицательное направление векторов поля (*по изолиниям на вертикальных и горизонтальных сечениях*).

Геотермический этаж осадочного чехла может подразделяться на ряд горизонтов. К примеру «*деятельного*» слоя, в котором имеются колебания сезонных температур и нейтрального слоя постоянных годовых температур; «*геохимического барьера*», образованного зоной встречного движения экзогенных кислых растворов обогащенных кислородом и эндогенных восстановленных щелочных флюидных потоков; «*градиентного*» слоя, представляющего собой участки максимальных температурных контрастов до кристаллического фундамента. Чехол отличается большим многообразием форм и размеров в сечении тепловых ям

(впадина-грабен) и холмов (выступ-горст). Учитывая, что локализация углеводородов наиболее часто связана со структурным типом ловушек с относительно неглубоким залеганием, то геотермические седловины и низкотемпературные карнизы являются перспективными объектами поисковых работ.

Геотермический этаж земной коры дешифрируется многочисленными зонами разуплотнения пород с очень изменчивой морфологией границ, что вполне согласуется с ранее установленными объектами Татарского и Токмовского сводов [65]. Теплофизическая модель представляется в виде конфигурации изолиний с контрастным изменением скорости потока теплового излучения (рис.3.1). О крупных и разнотипных структурах можно косвенно судить по очень высокой и/или низкой величине поля. Однородные по морфологии блоки окрашены равномерно, с незначительным увеличением или уменьшением цвета. Некоторое различие поля внутри объекта в виде проявляющихся локальных тел указывает на сильную изменчивость (*расслоение*) внутренней конструкции среды.

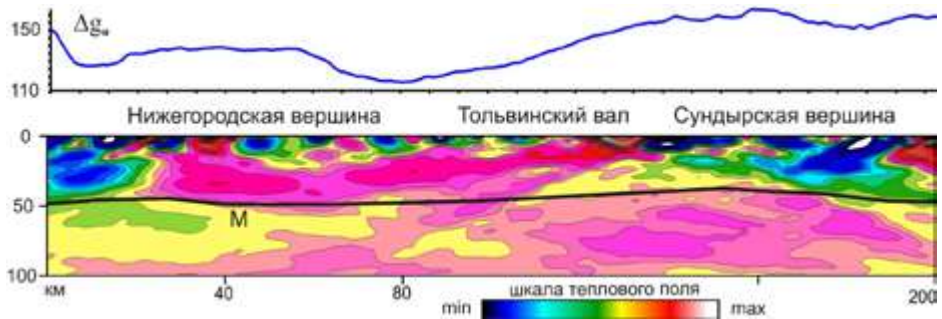


Рис. 3.1. Дифференциальная модель теплового поля литосферы Токмовского свода с местоположением границы Мохоровичича (М)

К региональным границам раздела нижней части земной коры относят сейсмическую поверхность Мохоровичича, как правило, расположенную на глубинах 35–50 км и внутрикоровую границу Конрада на 15–25 км. По форме они яснее выражены на разрезах блоково-разломных структур, в виде градиента плотных пород литосферы (рис.3.2). В этом случае структура поля обусловлена пологими сдвигами и встречными надви-

гами, среди которых простые прямолинейные вертикальные разломы крайне редки.

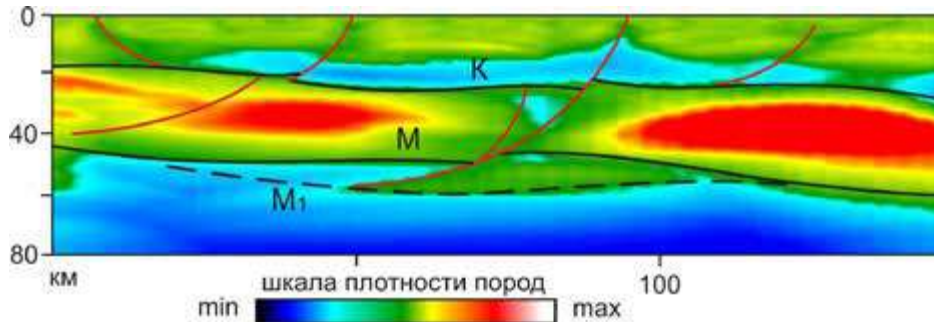


Рис. 3.2. Модель литосферы, отражающая тектоническое расслоение по границе Конрада (К) и поверхности Мохоровичича (М – современная и M_1 – реликтовая граница)

Верхний горизонт двумерной модели отвечает блоковому строению метаморфических образований земной коры. Нижние горизонты имеют закономерное чередование низко- и высокотемпературных слоев с аномальным изменением теплового режима в латеральном направлении. Они имеют клинообразную форму, поэтому их относят к аллохтонным литопластинам. В промежутке они обладают серпентинитовой смазкой, по которой происходит латеральное смещение крупных блоков. Зона скольжения характеризуется пологим падением. Прослеживаемый на глубине 12–18 км относительно холодный горизонт (*синего цвета*) имеет сложную конфигурацию, часто бывает очень отчетливым, но проявляется не везде.

Формирование клиновидных структур является одним из решающих условий в физической неоднородности слоистой среды. Образование может быть описано механизмом вклинивания, согласно которому зарождение и развитие данного слоя происходит на границе реологического слоя путем расщепления вдоль пластичного горизонта (*низкотемпературного с конвективным теплопереносом*) и внедрения в него жестких пластин (*высокотемпературных с кондуктивным переносом тепла*). Разрывные деформации, секущие вышележащие отложения, на глубине затухают и рассеиваются, достигнув достаточно мощной толщи. В этих условиях движущиеся пластины не прорываются к дневной поверх-

ности, а перемещаются в ограниченном интервале, образуя аллохтонные клинья. Этому способствует и относительно высокая плотность верхней части коры, благодаря чему пластины погружаются в менее плотные отложения [107,19].

Другим необычным, но широко распространенным видом земной коры является надвиговая форма аллохтонных литопластин. Например, чешуйчатое тектоническое расслоение структур, мощность которых местами достигает десятки километров. Образующиеся тектонические ансамбли скучивания слоев, система листрических сбросов формируют структуру «домино», разбивая блоки на сегменты (рис.3.3).

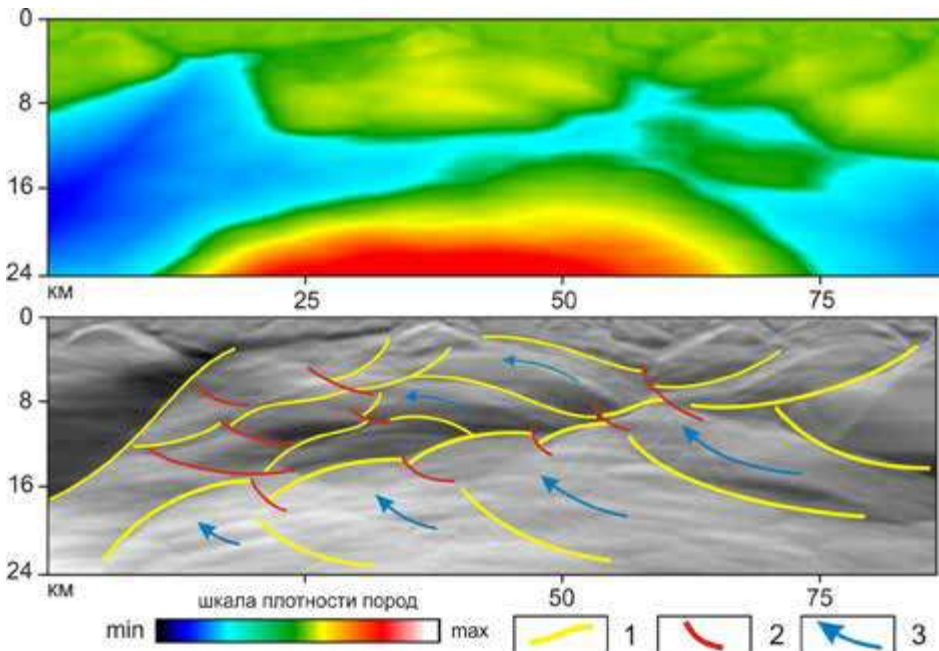


Рис. 3.3. Графический образ литопластин в цветном и монохромном изображении по профилю Литомержице-Теплице (Чехия). Условные обозначения: 1 – границы блоково-разломных структур; 2 – разломы; 3 – направление смещения блоков

Анализ строения и формирования клиновидных надвигов позволяет рассматривать многие из них как перспективные для поисков нефти. Такой вывод следует из механизма их развития, который стимулирует

целый ряд процессов, благоприятствующих образованию структурных форм в осадочном чехле. Эти процессы связаны с формированием тектонических экранированных блоков верхней части коры и линейно ориентированных антиклинальных валов. Кольцевые структуры осадочного чехла и разломной тектоники способствуют эффективной миграции флюидов [65].

Эффекты сжатия и растяжения, сдвига и надвига крупных блоков является процессом естественной деформации, которую можно различить по качественным показателям – интенсивности теплового поля и планового положения линий градиента для характерных глубин (рис.3.4). Это действие следует называть *горизонтом прогноза*.

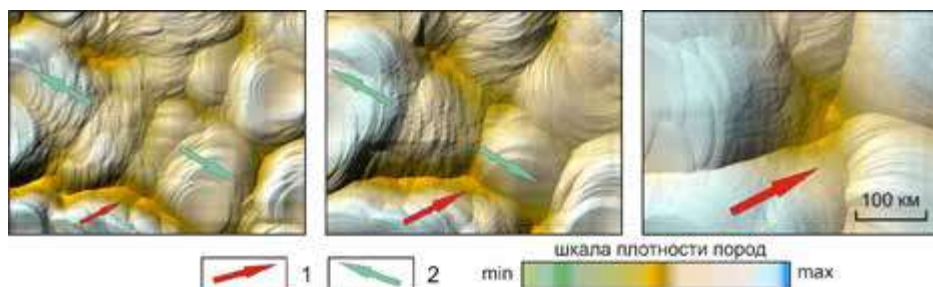


Рис. 3.4. Карта-срез блоково-разломных структур ЗК на глубинах 2, 6 и 10 км. Условные обозначения: направление смещения блоков 1 – сдвиг (надвиг), 2 – растяжение

Морфология среды прослеживается по цвету оттенков рисунка при переходе к менее плотным блокам. А когда становятся понятны закономерности изменения картины деформации, то можно выявлять и очертывать новые образования и выходить на скрытые тектонические структуры. С увеличением глубины сменяется стиль – от хаотичного вида к упорядоченному режиму развития Земли. Очевидно, что проявление фрактальности в структурообразовании – неотъемлемая часть многих геологических процессов. В этом случае горизонтальные движения приводят к растяжению среды с образованием тектонических нарушений. Смещение неоднородностей создает надвиг геоблоков, сжимая фигуру относительно ортогонального направления.

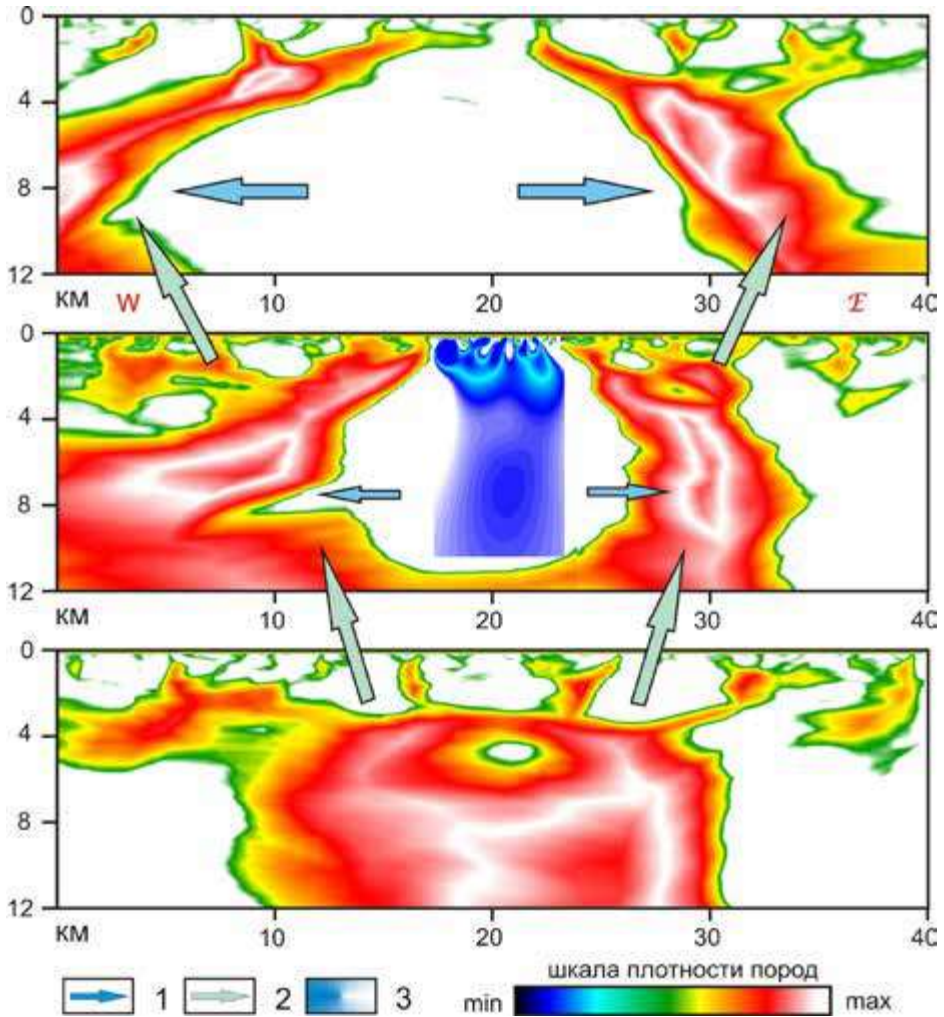


Рис. 3.5. Сечение блоково-разломной структуры по профилям (Гвинея).
Условные обозначения: направление смещения блоков 1 – растяжение,
2 – сдвиг (смещение), 3 – зона источников аномального ТП

Эффект деформации среды рассматривается для разреза внутренней структуры как горизонтальное растяжение со смещением краевых частей (рис.3.5). Расстояние между профилями 10 км. В области понижения плотности среды появляется локальная зона аномального ТП. Глубинный ло-

кальный очаг ТП расположен в теле фундамента на глубине 8 км. Исходя из рисунка поля этот подход следует называть *вертикальным прогнозом*.

Тектоноферные зоны и интрузивные тела. Тектоноферы (*tectonofers*) – глубокая подвижная зона, служащая каналом повышенного восходящего теплового потока [92]. Тепловые процессы, созданные тектонофером, приводят к возникновению глубинных магм. Реальные среды в районах с разным геологическим строением и временем консолидации структур имеют зоны с инверсией теплового потока в осадочном чехле, коре или в верхней мантии. Наличие таких зон следует рассматривать как фундаментальную особенность строения литосферы.

Дислоцированность пород в земной коре значительно выше, чем в мантии. Они состоят из системы гетерогенных тел с латеральными изменчивыми свойствами. Эти неоднородности литосферной мантии имеют четко выраженный рисунок. Хорошо просматриваются структуры, сопоставимые с куполами, мантийными диапирами, зонами скучивания и шарьирования. Этот факт свидетельствует о том, что мантия не утрачивает связи с геологическими структурами верхних горизонтов коры. Указанная связь подчеркивается прямым продолжением в литосферную мантию разломов, проявленных на поверхности и в земной коре. Фиксируются разломы двух типов – пологие и крутопадающие.

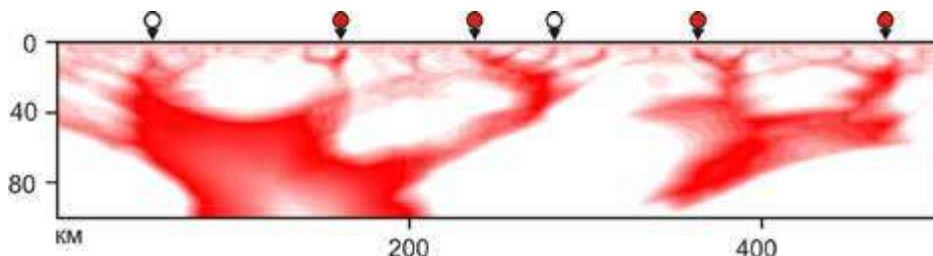


Рис. 3.6. Вид тектоноферных зон плато Джос в Республике Нигерия

Глубинную модель провинции Джос можно представить как крупный блок литосферы, разделенный наклонными тектоноферами (рис.3.6). Мощная зона представляет собой слой верхней мантии, периодически возбуждающийся в отдельные тектонические эпохи. По глубине располагаются очаги расплавов. Вдали от блока истощенной литосферы прояв-

ляются очаги плавления малоглубинных толеитовых базальтов, по мере приближения к срединному массиву – более глубинные очаги щелочных оливиновых базальтов, а в пределах блока истощенной литосферы – очаги щелочно-ультраосновных пород. На больших глубинах возможно образование магматических тел лампроитового и кимберлитового состава.

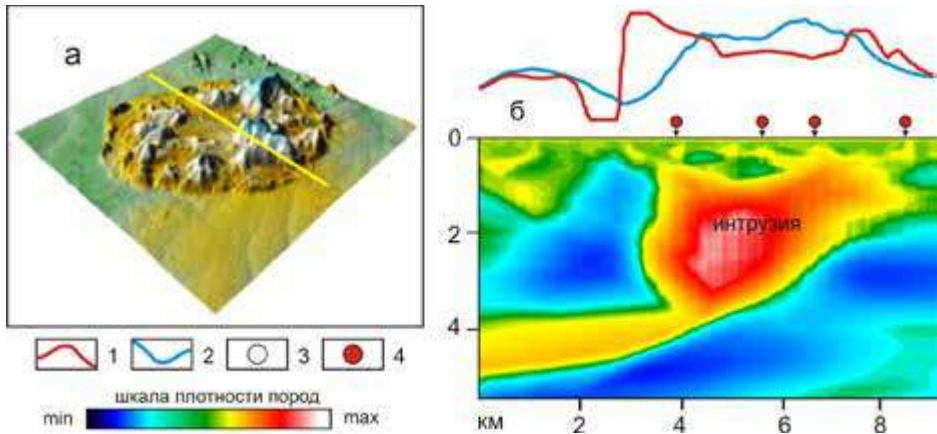


Рис. 3.7. Модель кольцевой структуры Riruwai-Younger Granite Complex (Нигерия). Условные обозначения: рельеф и местоположение профиля (а); модель интрузивного образования по ТВТ (б); 1 – график магнитного поля [10], 2 – изменение плотности среды на глубине 1 км, 3 – известные месторождения металлов, 4 – перспективные зоны формирования руд

Древние кристаллические породы содержат руды цветных и редких металлов, по-видимому, формирующиеся в активизированных разнородных блоках литосферы. Основные россыпные и коренные месторождения (урана, марганца, вольфрама, золота, меди, молибдена, свинца и цинка) размещаются в пределах сланцевых поясов на северо-западе и юго-западе Нигерии. В центральную часть Дагомейско-Нигерийского массива по разломам меридионального направления внедрены субвулканические кольцевые интрузии щелочных гранитов (рис.3.7). Возраст интрузии – средняя юра. Над плато местами возвышаются полуразрушенные конусы древних вулканов, различного рода останцы в форме пиков, куполов и столовых гор.

Тектонические нарушения среды. Вертикальными границами раздела геотермических этажей являются глубинные разломы, проявляющиеся в осадочном чехле, коре и мантии в форме вертикальных, наклонных или листрических зон (рис.3.8).

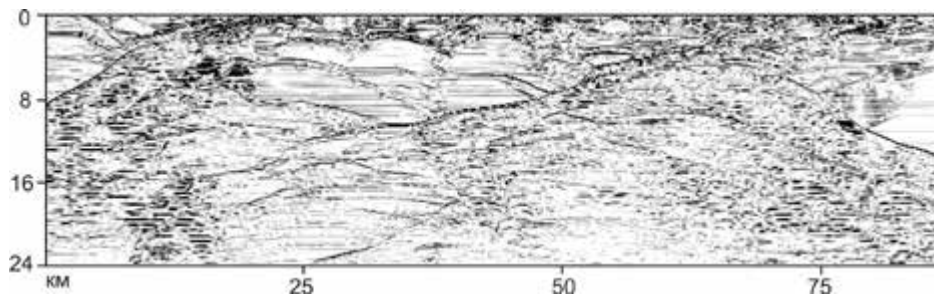


Рис. 3.8. Дифференциальная модель разломов и трещиноватости структур земной коры в монохромном изображении

Штриховатость среды наиболее четко проявляется при интерпретации моделей в теневом изображении дифференциальных характеристик блоково-разломной тектоники. В разнородных тектонических зонах фиксируются непротяженные горизонтальные или наклонно падающие отражающие площадки, а в прозрачно-однородных телах (моноблоках) – полное отсутствие ярко выраженных динамических границ. Полупрозрачные зоны, разобщенные либо выраженные ансамблями (разница в отражении интенсивности поля), являются переходными трехмерными объектами, отличающимися физическими свойствами. Все вариации ТП можно объяснить в основном перераспределением глубинного потока тепла в условиях контраста теплопроводности, теплоемкости и плотности слоев. Наиболее резкие искажения возникают на контакте разнотипных структур.

Неравновесным энергетическим системам свойственны диссипативные структуры определенных фрактальных размерностей. Наиболее близкой по своей физической природе являются разломные образования в виде *древовидного* рисунка. Тенденция к последовательной генерализации смежных блоков – это объективно существующее природное явление, которое хорошо согласуется с другими геофизическими полями. Перемещение блоков может происходить вдоль одной или нескольких

поверхностей, выражаясь интенсивными деформациями с нарушением слоистости среды. Важнейшими характеристиками морфологической классификации являются элементы залегания поверхности сместителя и величина (амплитуда) перемещения вдоль разлома. По ТП успешно находят составляющие амплитуды смещения по падению (вертикальная) и простиранию (горизонтальная). С этой целью строят разрезы и карты-срезы для различных глубин блоково-разломных структур, которые могут быть представлены постепенно затухающей трещиноватостью, рассланцеванием и мелкой дисгармоничной складчатостью (рис.3.9).

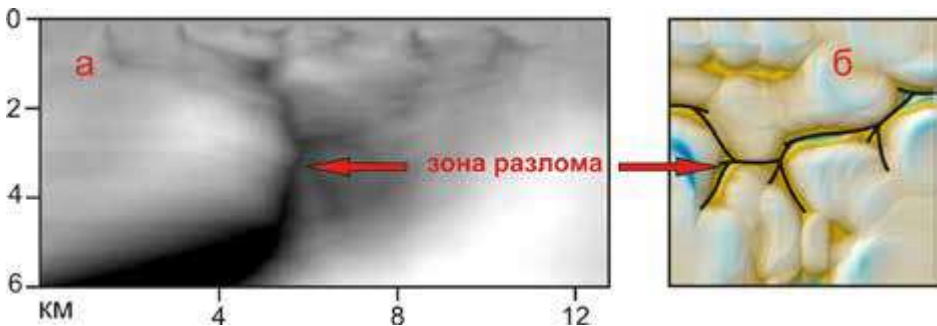


Рис. 3.9. Характерный вид разломной тектоники в разрезе (а) и на карте блоков (б)

Для молодых, активных разрывных нарушений это правило в основном соблюдается. Очевидно, что строение проявляется значительно ярче из-за существующей зональности, образованной вокруг флюидной системы, сопровождающей развитие тектоники. Залеченные во времени древние разломы могут не проявляться в рисунке, на что неоднократно указывало моделирование ТП в различных геологических условиях. В целом наши методические приемы комплексной интерпретации материалов, в сравнении с другими видами наземных геофизических исследований, позволяют оперативно провести оценки нижней границы проникновения разрывных нарушений, мощности, направления падения и угла наклона разломов.

Горст и грабен кристаллического фундамента. Эти объекты дают начало формирования унаследованным структурам осадочного чехла, тем самым являясь решающим фактором образования типичных ловушек

углеводородов (рис.3.10). Одновременное опускание и растяжения фундамента приводят к синклиальному изгибу слоев чехла, отделенных с обеих сторон разрывами от смежных зон. Горст-антиклиналь характеризуется относительно повышенным значением поля.

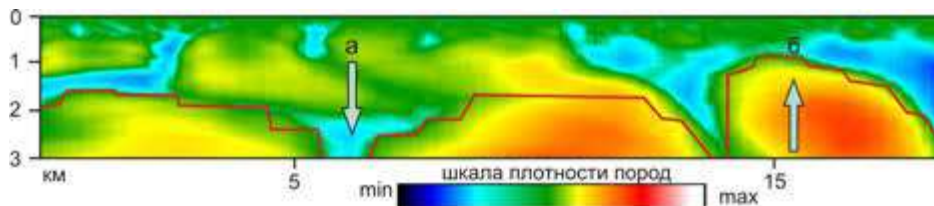


Рис. 3.10. Морфоструктурный вид формирования грабена (а) и горста (б) по фундаменту

Кольцевые структуры осадочного чехла. В площадном варианте аномалии ТП имеют различную амплитуду, форму и размеры, так как зависят от строения и глубины залегания геологических объектов. Эндогенные концентрические тела хорошо отражаются на картах локального поля в виде пересекающихся зон различной окружности и дуговых элементов (рис.3.11). Формирующие их листрические разломы, как правило, имеют глубину проникновения, равную радиусу кольцевой структуры.

Различают следующие виды морфологии теплового поля: изометричная, полосообразная (создается геологическими объектами, имеющими постоянное поперечное сечение и простираение в одном направлении) и мозаичная (формируется несколькими объектами, залегающими на различных глубинах) форма. Среда развивается в результате тектонических движений по листрическим разломам фундамента и последующей деструкции осадочного чехла. Образованные кольцевые структуры являются геологическими объектами, которые содействуют значительному уточнению перспектив нефтеносности.

С помощью цветовой раскраски выделяют разные по интенсивности зоны, *прогретые* и *холодные*. В ряде случаев их интерпретируют как структурные формы поднятий и опусканий. Места интенсивных тепловых аномалий, разделенные между собой холодной зоной (*синего цвета*), образуют зоны растяжения с уступообразными участками. При рассмотрении карт-срезов в интервале заданных глубин чехла и фундамента сле-

дует обращать внимание на форму в плане и интенсивность аномальных холодных участков, в которых наблюдается активная циркуляция флюидов. Они встречаются двух видов – изометричной и линейно-вытянутой формы.

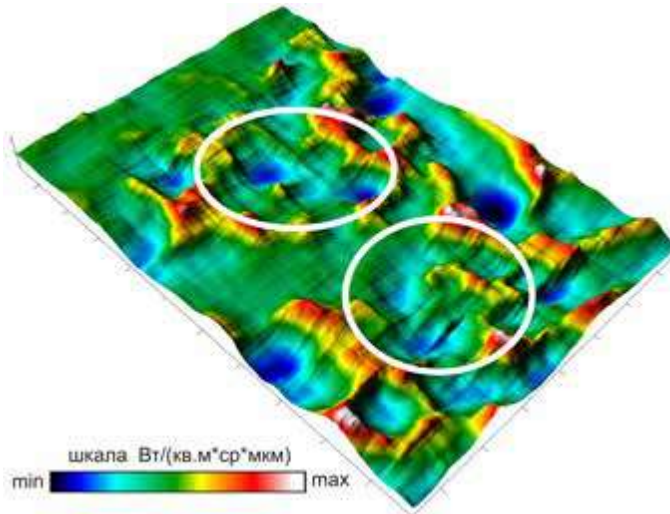


Рис. 3.11. Карта-срез объемного локального теплового потока с изображением кольцевых структур осадочного чехла

3.2. Развитие тепловой зоны вокруг флюидных систем

Из анализа разнообразных геологических явлений и оценки их роли в формировании теплового поля следует выделить ряд факторов, влияющих на региональные закономерности распределения потока в осадочном чехле.

Движение подземных вод. Длительная фильтрация подземных флюидов влияет на геотермический режим, вызывая увеличение или уменьшение плотности теплового потока. Движение подземных вод происходит в двух направлениях – латеральном (по простиранию водоносных горизонтов) и вертикальном (через слабопроницаемые отложения, в зонах разломов, областях питания или разгрузки). Хотя гидродинамический фактор имеет второстепенное значение, не исключается возможность влияния подземных вод на локальных участках. Выполненные нами гео-

термические построения свидетельствуют о незатухании с глубиной интенсивности движения подземных вод (рис.3.12).

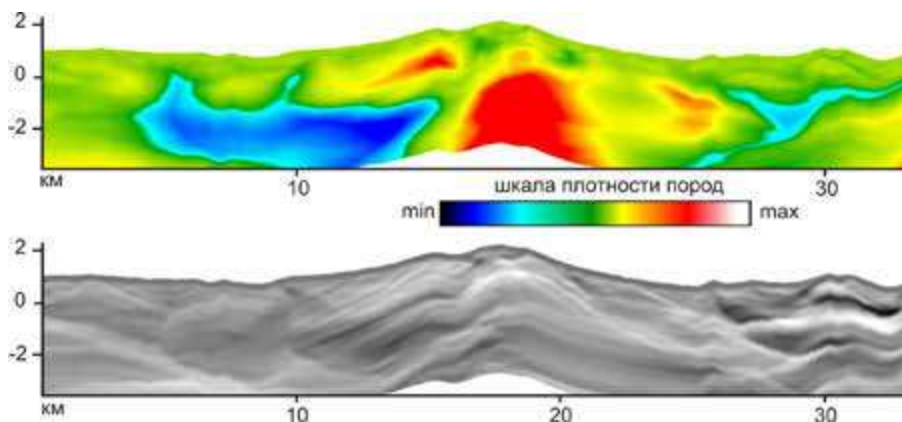


Рис. 3.12. Модель блоково-разломных структур в цветном и монохромном изображении вулкана Мутновский геотермального района Камчатки

Глубинные разломы. Увеличение теплового потока в зонах глубинных разломов является основной, но не обязательной причиной дифференциации любого региона по геотермическим условиям. Анализ крупномасштабных геотермических построений показал, что к некоторым разломам могут быть приурочены аномалии ТП. При большой протяженности разлома аномалии могут иметь место в одной его части и отсутствовать в других. Глубинные разломы, различающиеся по признаку древнего возраста заложения, не сопровождаются интенсивными аномалиями геотермического поля. Если же в зонах разломов возникают условия обновления с последующим проявлением активности флюидной проводимости, то площадь распространения вновь образованных тепловых аномалий зависит от масштабов вертикальных перетоков подземных флюидов по проницаемым горизонтам. Аномальный эффект будет значительно больше при наличии группы близко расположенных и одинаково ориентированных разломов.

Изменение литологического состава осадочного чехла. При определении региональных закономерностей изменения структуры современного теплового потока не следует пренебрегать этим фактором, так как оса-

дочные породы обладают различными теплофизическими свойствами. На основе синтезированных данных обработки тепловизионных снимков геотермические объекты (*источники*) имеют следующие образы.

Во-первых, наблюдается формирование системы низкотемпературных камер, закономерно располагающихся по глубине, с постепенным увеличением своих размеров. В ряде случаев камеры образуют в пространстве региональную зону трещиноватости среды, объединяясь между собой узкими вертикальными и/или наклонными каналами, представляющими зоны подтока флюидов в породах разного вещественного состава (рис.3.13).

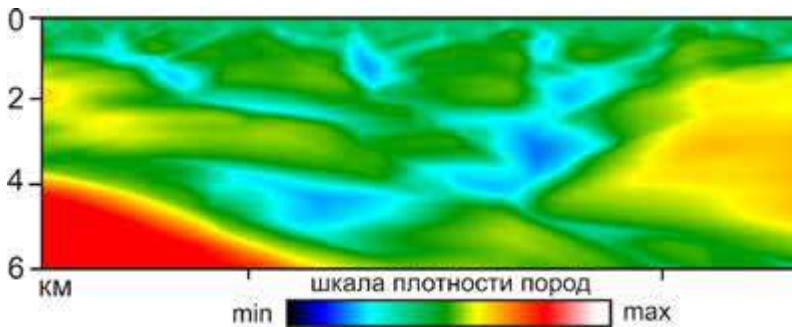


Рис. 3.13. Модель блоково-разломных структур с расположением низкотемпературных камер

Система разломов играет роль подводящих каналов (*голубой цвет*) для поступления к поверхности жидкостей, с созданием разнонаправленных перетоков в проницаемых средах и накоплением флюидов в пористых средах в виде многоэтажных камер (*синий цвет*).

Во-вторых, распространение источников тепла направлено к дневной поверхности в виде одиночных или древообразных (*разветвляющихся*) в пространстве зон с включением локальных (*красный цвет*) сферических тепловых камер (рис.3.14). Они приурочены, как правило, к разломам с гидротермальной разгрузкой.

По вейвлет-анализу поля определяют глубину, центр и интенсивность источника эндогенного тепла. По концентрации источников в пространстве находят уровни региональных геотермических этажей, на которых

локализируются аномалии высокой теплогенерации. По углу наклона распространения тепловых источников устанавливаются контактные зоны формирования горизонтов земной коры, природа и основной механизм теплопереноса.

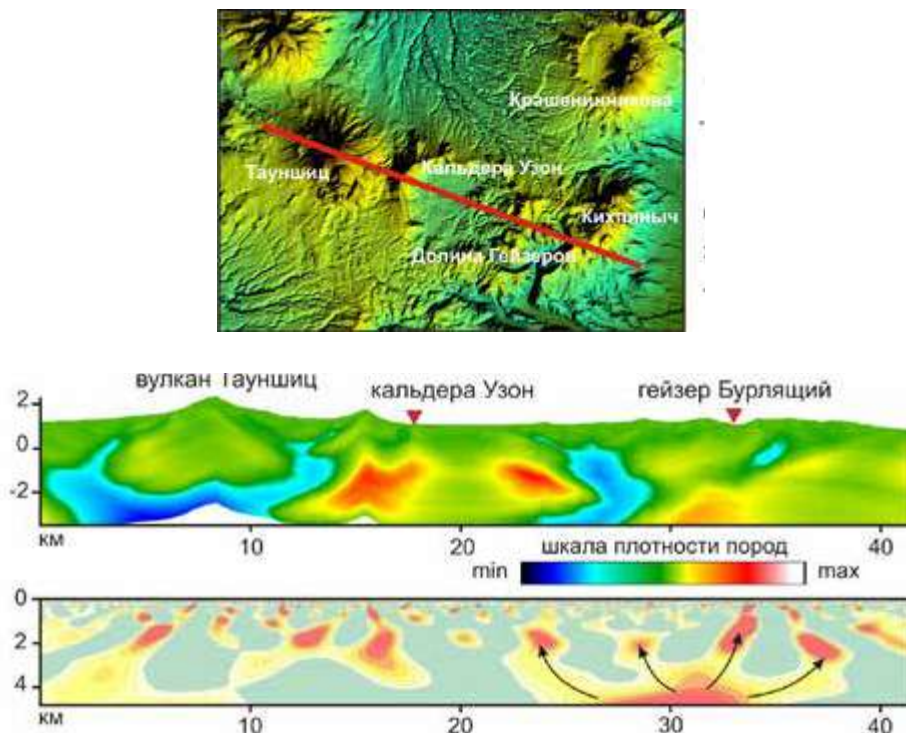


Рис. 3.14. Карта рельефа местности, модели блоково-разломных структур и локальных источников теплового поля Узон-Гейзерного геотермального района Камчатки

В-третьих, размеры и глубины залегания камер имеют между собой корреляцию и приурочены, как правило, к геотермическим этажам. Глубинные источники, передавая тепловую энергию Земли в вышележащие горизонты, уменьшаются в своих размерах. При появлении разуплотненного водоносного горизонта эта связь частично нарушается. По форме изолиний интенсивности источников ТП можно контролировать расположение холодного флюида, заполняющего пористый слой.

В-четвертых, возникают природные условия, когда источники поля могут располагаться внутри разуплотненных зон и своей формой изолируют обрисовывать положение восходящих участков тектонических нарушений. Возможно, что такое поведение поля непосредственно указывает на выход глубинных термальных вод на поверхность.

В-пятых, источники тепла располагаются, как правило, в краевых частях блоков плотных пород, в большей степени описывая морфологические признаки структурных неоднородностей. Из этих данных следует, что равномерное распространение и вынос тепла по всему объему структур маловероятно. По-видимому, в разрезах мы выделяем локальные участки среды, в которых интенсивность поля стремится к аномальным значениям.

Условия возникновения геотермальных источников и особенности проявления их на поверхности Земли непосредственно связаны со строением литосферы. В частности, мощным проявлением разломной и магматической активизации, существованием неглубоко залегающих очагов частичного плавления слоев (астеносферы), интенсивного развития субдукции литосферных плит и влиянием геодинамической активной сейсмофокальной зоны *Вадати-Заварицкого-Беньофа* на тепловой режим региона.

Следовательно, важнейшими поисковыми признаками проявления геотермальных объектов (*источников*) являются: восходящие узкие проницаемые зоны в модели блоково-разломных структур, которые формируют промежуточные слои разуплотнения (*флюидонакопления*); узкие проницаемые каналы, расположенные вблизи эндогенных источников тепла, которые могут восполнять потерю тепловой энергии глубинного флюида за счет дополнительного прогрева; совпадение цепочки тепловых локальных источников с зонами разуплотнения среды, которое указывает на прямую связь с гидротермальным объектом; мощные зоны разуплотнения пород, заполненные водным раствором, в которых изотерма может и не достигать аномальных значений; выходы на земную поверхность эндогенного тепла, отражающегося в графиках спектрзональных данных природно-ландшафтной системы.

3.3. Способ выявления залежей углеводородов

Известен ряд способов при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, осуществляемых путем наземных инструментальных измерений естественных и искусственных электромагнитных полей, регистрации сейсмических сигналов, бурения скважин с каротажем геофизического поля. Выявление перспективного участка, в недрах которого локализованы залежи углеводородов, определение наиболее вероятной глубины залегания и контура границ искомой залежи проводят путем площадной съемки и построения карт и разрезов аномальных значений физического поля. Несмотря на успешное развитие, методы содержат ряд недостатков. В частности, относительная трудоемкость регистрации геофизического поля наземным способом, большие временные и материальные затраты при получении исходного поля, сложность или невозможность использования их в труднодоступных условиях таежного–болотистого–озерного ландшафта, зависимость достоверности конечных результатов от применяемой модификации метода и технологии интерпретации на этапах региональных, поисковых и разведочных работ.

Многие недостатки и сложности в реализации приведенных выше способов снимаются, если использовать дистанционную систему цифровой регистрации параметрических данных при сканировании площади и последующим расчете физической модели геологической среды. С этой целью предлагается использовать спектрозональные космические снимки поверхности Земли. Обработку тепловизионного изображения проводят путем расчета и построения объемных моделей плотности потока теплового излучения и блоково–разломных структур. Затем выделяют локальные участки ТП, наиболее благоприятные для объемной концентрации углеводородов и воды в геологической среде, разбивают зоны по глубине и ранжируют объекты на перспективные, с неясными перспективами и бесперспективные типы. Результативные карты составляют путем морфо–структурной интерпретации и наложения полученных данных на топографическую основу, используя векторные и растровые электронные карты высокого разрешения, с добавлением необходимой текстовой и графической информации, включая классификацию геологических объектов.

Поиск месторождений полезных ископаемых (*нефть, газ*) на континенте и шельфе моря дистанционным тепловизионным зондированием является инновационной технологией (*патент России на изобретение*) [73,35,38]. На этапе геологоразведочных работ метод тепловизионной томографии обеспечивает оперативное изучение больших площадей. Он позволяет проводить тектоническое районирование слабоизученных территорий и на этой основе выделять зоны нефтегазонакопления. В результате составляются карты наиболее перспективных участков ловушек нефти и газа, на которых в первую очередь необходимо проводить сейсморазведочные работы.

Эффективность выявления нефтегазоносности по значимости геотермического критерия достигается путем использования *тепловизионной томографии геологической среды* в пространстве (*3D-TBT*), дающей возможность проверить состояния геотермических ловушек углеводородов, установить качество непроницаемых покрышек и зон накопления флюидов, определить наличие разрывных нарушений через трассирование зон разгрузки глубинных вод, их влияние на сохранность залежи.

Остановимся на факторах, влияющих на распространение теплового поля в среде.

Свойства и литологический состав геологической среды, в которой сформирована залежь УВ. Например, теплопроводность терригенных отложений изменяется в пределах 0,27– 4,85 Вт/(м·К), постепенно снижаясь с увеличением глинистости пород. В карбонатных отложениях наименьшую теплопроводность имеют известняки и мергели. Контрастность аномалий локального теплового потока с глубиной заметно меняется в зависимости от объемной плотности и теплоизоляционных свойств пород. Изменение яркости аномалий на однотипных по форме структурах свидетельствует о разном времени формирования месторождений и интенсивности миграции углеводородов.

Структурные эффекты осадочного чехла, к которым относят структурную, литологическую или другие типы ловушек; зональность распространения коллектора; многоуровневое залегание продуктивных пластов; тип и свойства покрышки (*структурное нарушение или целостность пород*). Следует отметить ряд условий, формирующих масштабную

геотермическую аномалию: фактор постоянства температурной передачи в среде; тепловой поток должен быть интенсивным по отношению к процессу *рассасывания* и мощным, чтобы обеспечить величину контрастности локальной аномалии, которая с глубиной заметно меняется. Всем этим условиям отвечают структурно-тектонические и литологические особенности, ловушки и процессы. Ранее установлено, что в своде продуктивного слоя температура выше, чем на периферии и конвективный тепловой поток концентрируется в центре залежи и замыкается на крыльях. При этом максимум ТП выражается рельефнее структурного свода.

Распространение тектонических нарушений во внутриконтурном пространстве. Пересекающие нефтяную свиту разломы создают зону пониженного давления, куда из нижележащих слоев устремляется нефть с газом и водой. Не меньшее значение имеют сбросы в пределах нефтеносных пластов, создающие барьеры на пути движения нефти. Основная часть флюидов удерживается крыльями и сводами пликативной складчатости.

Механизм циркуляции подземных вод в среде, связанный с эндогенными и экзогенными природными эффектами. Преобладающее направление локального уровня перетока пластовых флюидов по вертикали (*восходящие, нисходящие*) и латерали (*фильтрационно-диффузионный перенос рассолов*). Интенсивность и путь миграции флюидов с большими и малыми градиентами движения в наклонном слоисто-неоднородном пласте определяют состояние термического равновесия большинства скважин.

Результаты использования дистанционного тепловизионного зондирования на основе новой технологии позволяют расширить область применения и задачи метода на стадиях региональных, поисковых и разведочных работ; сократить сроки геологоразведочных работ; уменьшить затраты на сейсморазведочные работы и бурение; повысить достоверность прогнозирования ловушек углеводородов; создать базу данных по изучаемым объектам с целью более рационального и эффективного проведения поисково-разведочных геофизических работ.

Остановимся на геоинформационной возможности тепловизионной томографии. По объектам и методам изучения исследования включают

три уровня, направленные на решения вопросов генерации, аккумуляции и консервации углеводородов.

Региональный уровень исследования – в литосфере выделяются относительно мощные горизонты, границы разделов и структура блоков земной коры, которые являются потенциально нефтегазоносными или еще с невыясненными перспективами. Область исследования ограничена пространством, которое не является нефтегазоносным.

Тектонический каркас теплового поля на различных масштабных уровнях изучается по космическим снимкам и путем сопоставления с априорными данными наземных геофизических методов. Опираясь на современные концепции тектонических потоков в формировании Земли и принцип актуализма, создаются физико-геологические модели, отражающие тепловую делимость литосферы на разных уровнях, устанавливаются связи слабо расчлененной верхней мантии со структурами земной коры [123]. Такая дифференциация позволяет давать отдельную оценку прогнозных запасов нефти и газа.

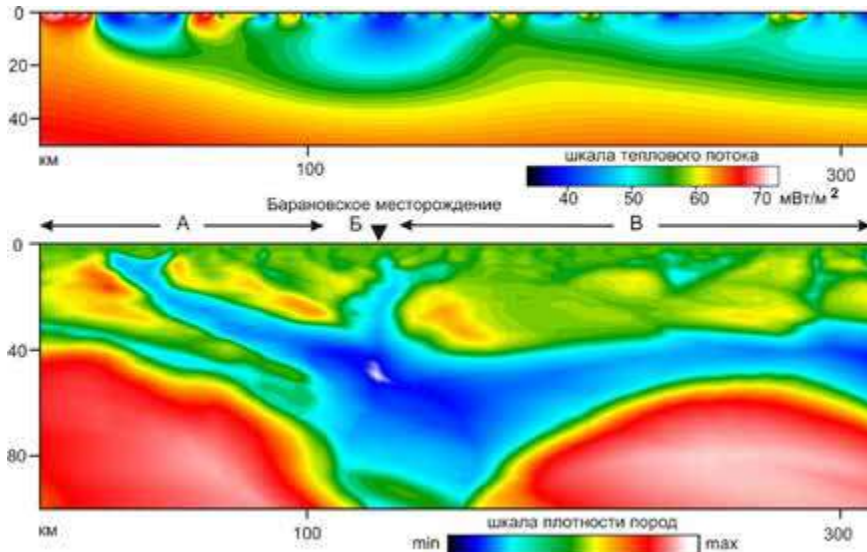


Рис. 3.15. Региональная модель теплового потока и блоково-разломных структур литосферы Токмовского свода (А), Кузнецкой седловины (Б) и Жигулевско-Пугачевского свода (В) Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

Сформированные в литосфере региональные разломы оказывают существенное влияние на размещение месторождений углеводородов и служат индикаторами перспектив отдельных участков. Модели блоково-разломных структур (*срезы и разрезы*) отражают основные особенности строения ЗК. Одним из глубинных признаков формирования углеводородов является приуроченность участков к крупным вертикальным зонам разуплотнения в земной коре. По ним происходит перемещение флюидов и их концентрация в структурах осадочного чехла при наличии ловушек и покрышек (рис.3.15).

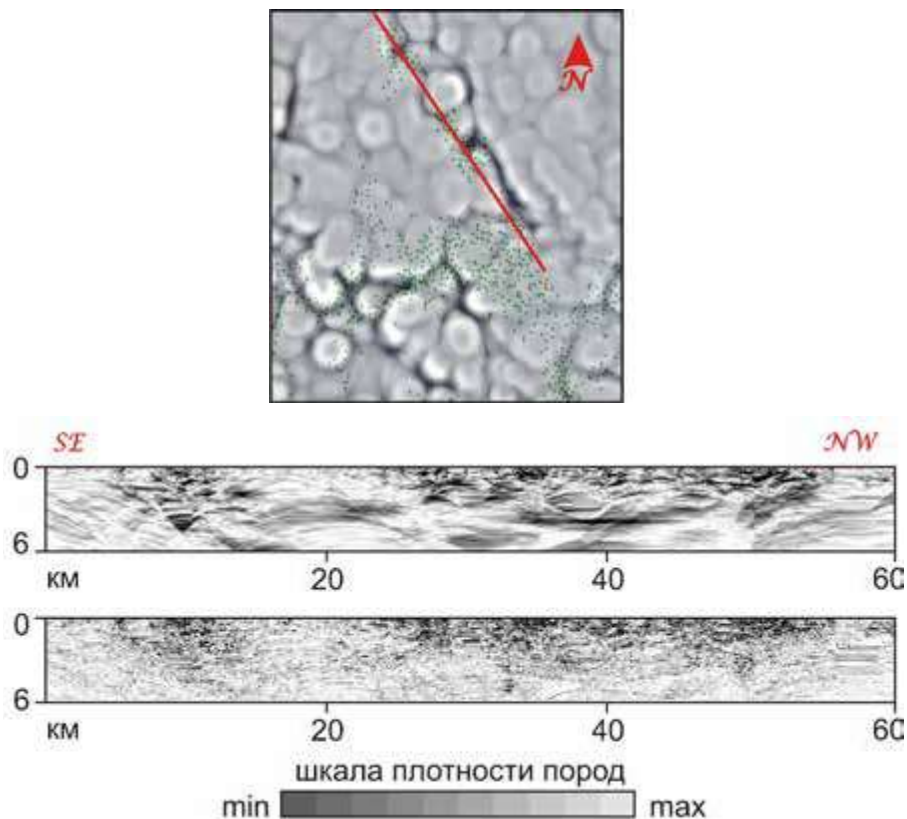


Рис. 3.16. Карта-срез блоково-разломных структур на 2 км с местоположением скважин и дифференциальные разрезы с зонами трещиноватости для Южно-Уральской впадины

В региональном масштабе можно уточнить перспективы отдельных структурно-формационных зон, грамотно подойти к оценке новых лицензионных участков. Приведем в качестве примера возможность выявления закономерностей формирования месторождений Западно-Сибирской провинции (рис.3.16). Комплекс тепловых признаков позволяет с высокой вероятностью разделить на непродуктивные и продуктивные участки с интенсивной нефтедобычей, оптимизировать геологоразведочные работы, разработать стратегию дальнейших поисковых работ на УВ.

Принятая форма представления структуры в виде горизонтальных срезов теплового поля и дифференциальных трансформаций вертикальных разрезов обеспечивает систематизацию разрывных нарушений и районирование территории по характеру их пространственного распределения. В ходе дешифрирования выделяют тоновые особенности изображений, опосредованно характеризующие разломную и блоковую тектонику (*с ранжированием оперяющих нарушений на геодинамические зоны и шовные зоны фундамента*). Путь миграции флюидов нефти и газа от материнских продуктивных горизонтов к дневной поверхности происходит по вертикальным ослабленным зонам, которые отличаются темным тоном в монохромном изображении. Это наглядно иллюстрируется результатом совмещения материалов тепловизионного зондирования на уровне продуктивного горизонта УВ с местоположением добывающих скважин, выстраивающихся в череду слабо уловимых точек.

Однородные по морфологии блоки окрашены равномерно, с незначительным увеличением или уменьшением цвета. Некоторое различие поля внутри объекта в виде локальных тел указывает на сильную горизонтальную расслоенность, трещиноватость среды. Изменчивость внутренней конструкции представляет собой закономерное чередование площадок в разрезе, хорошо выдержанных прослоев. Отсутствие штриховатости свидетельствует о присутствии однородных по тепловым свойствам блоков, что позволяет интерпретатору достоверно оценивать формы структур.

Следовательно, региональный уровень это стадия районирования земной коры по условиям формирования нефти и газа в масштабе 1:100 000.

Анализ космической информации проводится с помощью специализированных программ, которые позволяют выполнять качественное и достоверное моделирование. В таблице приведена сравнительная информация сейсмического метода и 3D-ТВТ при поисках залежей нефти.

Ограничения сейсморазведки	Достоинства тепловизионной томографии
<ul style="list-style-type: none"> 1 – ограничение по масштабу съемки; 2 – применение сложной системы наблюдения поля с мощными источниками возбуждения; 3 – трудоемкость в обработке и интерпретации полевого материала; 4 – не рассчитывается трехмерная модель среды; 5 – неоднозначность определения скоростной характеристики коры; 6 – исследуется структурный характер земной коры; 7– трудоемкость, длительность и высокая стоимость полевых работ. 	<ul style="list-style-type: none"> 1 – достигается детальность масштаба 1:50 000 даже при оперативном изучении больших площадей; 2 – не требует мобилизации громоздкого оборудования, получения разрешения на проведение геофизических работ; 3 – возможность построения срезов и разрезов блоково-разломных структур по произвольным направлениям; 4 – возможность расчета 3D модели теплового поля и регионального потока; 5 – уверенное изучение геодинамических блоков и разрывов по глубине с районированием зон нефтегазонакопления; 6 – выявление структурных факторов и исследование термодинамических гетерогенных неоднородностей земной коры (реологического состояния вещества); 7 – короткие сроки (3–5 месяцев) и низкая стоимость геологоразведочных работ; ее рентабельность достигается с использованием новой технологии; 8 – создан банк данных космических снимков по многим регионам мира.

Совокупность информационного материала и опыт проведения исследований показал, что для оценки перспектив региональной нефтегазоносности термодинамическая характеристика столь же важна, что и гравитационная, магнитная, электрическая и сейсмическая. Учитывая относительную дешевизну, высокую производительность и информативность, тепловизионное зондирование может быть рекомендовано как обязательная составляющая комплекса геофизических методов, опережающая и дополняющая наземные полевые работы.

Зональный уровень исследования – районирование проводится внутри нефтегазоносного бассейна с целью выделения обособленных зон реального или возможного размещения месторождений нефтяных и газовых месторождений, объединенных общностью геологических условий нахождения. На данном этапе целесообразно воспользоваться сведениями об эталонном объекте, которые базируются на достоверной информации. Для визуализации трехмерного распределения ТП строятся карты латеральной изменчивости блоков на отдельных глубинах и вертикальные двумерные разрезы по выбранным профилям в масштабе 1:25 000 (рис.3.17). Основными группами показателей геологических параметров являются тип и форма ловушки, литологическая характеристика коллектора и покрышки. В целом по теплофизическим свойствам среды оценивают связи с другими геофизическими параметрами, выделяют прямые и косвенные показатели нефтегазоносности, возможность разделения поисковых критериев.

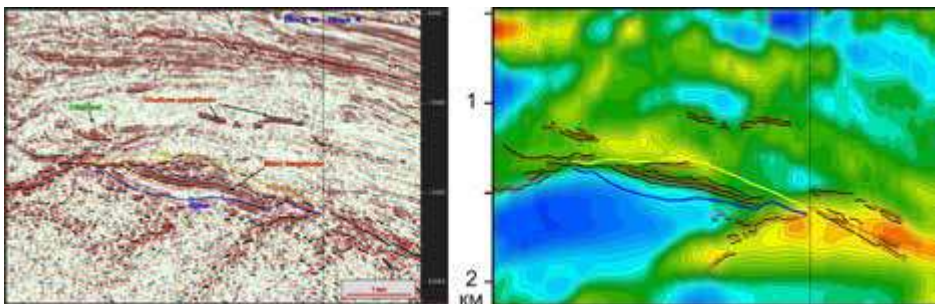


Рис. 3.17. Фрагмент сопоставления разрезов сейсморазведки и тепловизионного зондирования на примере шельфа Гвинейского залива

Зональный уровень работ – подготовка площади к поисковому бурению.

Ограничения сейсморазведки	Достоинства тепловизионной томографии
<p>1 – масштаб съемки до 1:50 000;</p> <p>2 – ограничение в сезонности съемки;</p> <p>3 – ограничение работ в труднодоступных условиях таёжного, болотистого и озерного ландшафта, горных систем;</p> <p>4 – построение двумерной модели среды (карт и разрезов) по произвольным направлениям профилей.</p>	<p>1 – масштаб съемки до 1 : 10 000;</p> <p>2 – широкий выбор спектрозональных снимков в разные периоды года;</p> <p>3 – исследования в любых условиях рельефа местности (тайга, джунгли, шельф, межгорные впадины), абсолютная экологическая чистота, высокая производительность и информативность;</p> <p>4 – изучение трехмерных моделей среды – кольцевых структур и сложно-построенных ловушек нефти;</p> <p>5 – комплексирование результатов 3D–ТВТ с любым геофизическим методом;</p> <p>6 – снижение в пять раз объема геологоразведочных работ и стоимости наземной съемки до 10 раз;</p> <p>7 – возможность ранней прогнозной оценки участка по перспективам поиска нефти и газа.</p>

Локальный уровень исследования – выделение в пределах зон нефтегазонакопления локальных структур с использованием геотермических признаков развития тепловой зональности вокруг природных флюидных систем и формирования (наличие) залежей УВ. Извлечение комплексной информации о пространственной и временной динамике спектральных параметров физиологического и текстурного состояния почвенно-растительного покрова в увязке с глубинным строением геологической сре-

ды в масштабе 1:5000. Это дает дополнительную геохимическую информацию, которая отражает аномальное воздействие УВ и подземных вод на верхнюю часть разреза.

Локальный уровень – поиск залежей нефти в перспективных структурах.

Ограничения сейсморазведки	Достоинства тепловизионной томографии
<p>1 – дорогостоящая 3D съемка перспективных структур;</p> <p>2 – нет корректных критериев разделения флюидонасыщения (вода-нефть)</p> <p>3 – ограничение в применении для биогермных структур, подсоловых горизонтов, разломов, шнурковых залежей.</p>	<p>1 – 3D модели перспективных структур в 10 раз дешевле по сравнению с сейсмическим методом;</p> <p>2 – детальная характеристика флюидных систем сформированных залежей;</p> <p>3 – эффективная интерпретация биогермных структур, соляных куполов, разломов, шнурковых залежей;</p> <p>4 – построение карт масштаба 1:2500 за счет высокого пространственного разрешения снимка;</p> <p>5 – локализация зон трещиноватости среды, сжатия, растяжения и разуплотнения пород, в состав которых входят зоны перетоков и накопления флюидов;</p> <p>6 – получение геохимической информации по картам спектральных индикаторов состояния природно-ландшафтных систем;</p> <p>7 – локальный прогноз нефтеносности и оптимизация местоположения скважины.</p>

Методика дешифрирования карт-срезов и разрезов эндогенного ТП нацелена на селективные отображения геодинамических блоков и граничных разрывов, морфологии тепловых неоднородностей, зон сжатия, растяжения и разуплотнения пород с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, способные быть природными резервуарами.

Выявляемые в разрезе геотермические аномалии, позволяют формализовать их в реальные модели сред, так как температурный режим пород (*ниже нейтрального слоя*) определяется восходящим эндогенным тепловым потоком, динамикой геологической среды и тепловыми свойствами пород. Через структуру ТП и ее геодинамическую интерпретацию с привлечением априорных геологических данных можно определить форму и механизм тепловых потоков, слоистость среды, возможности накопления и сохранность глубинных флюидов (*в частности, углеводородов*).

В способе прогнозирования перспектив нефтеносности участков следует исходить из регионального строения земной коры, особенности которого проявляются внутрикоровыми тепловыми локальными слоями и восходящими зонами разуплотнения. Морфология горизонтального расчленения и вертикальной раздробленности коры, как правило, контролирует положение крупных месторождений углеводородов. Можно представить, что по ней происходит перемещение глубинных флюидов и газов Земли, их последующая концентрация в структурах осадочного чехла при наличии ловушек и покрышек. Рассмотрение теории абиогенного глубинного происхождения углеводородов, которая связана с мантийными очагами вследствие неорганического синтеза, дает возможность сформулировать новые подходы к определению пространственных и физических параметров генерации и миграции нефти и газа. Они открывают принципиально новые перспективы разведки УВ ресурсов считавшихся ранее бесперспективными провинциями с позиции органического генезиса месторождений нефти и газа. Основными преимуществами ТВТ являются увеличение эффективности прогнозирования нефтегазовых залежей в 3-4 раза по сравнению со стандартными методами, возможность проводить исследования для регионов, где отсутствует геофизическая и геохимическая информация, значительное снижение стоимости геофизических работ, возможность определять положение для бурения скважин в зоне, представляющей интерес.

При изучении строения осадочного чехла в площадном варианте рассчитывается локальное тепловое поле, которое успешно используется для идентификации зон разуплотнения чехла и фундамента. Учитывая, что прослеживается определенная связь между повышением геотермического поля на уровне продуктивного пласта, то построение локальных

горизонтальных срезов поможет выделить залежь над фоновыми значениями. На картах-срезах локального теплового поля с помощью цветовой раскраски выделяются различные по интенсивности зоны, которые в ряде случаев можно интерпретировать как структурные формы складчатости слоев (рис.3.18). Геологическая природа горизонтов осадочного чехла с относительно стабильными геотермическими характеристиками отвечает плотным породам разреза. В линейных зонах, обусловленных разломами и трещиноватостями среды как вертикального простирания, так и горизонтального расслоения, несомненно, ведущая роль принадлежит конвективным флюидным потокам.

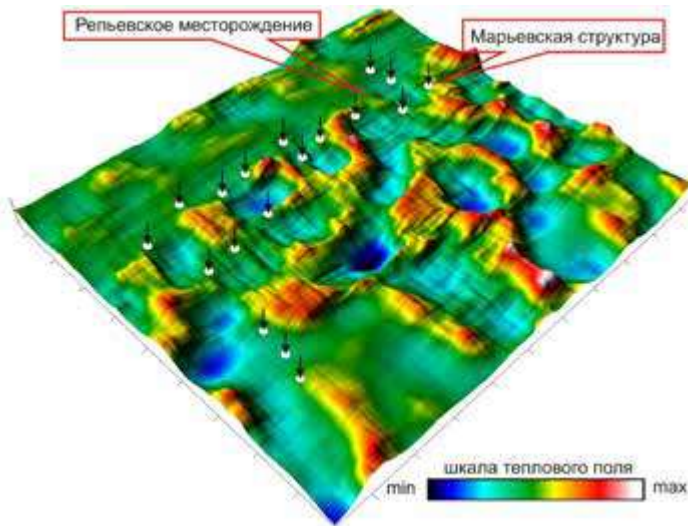


Рис. 3.18. Модель 3D локального теплового поля на глубине 1 км с выявленными перспективными объектами для накопления нефти

Природа происхождения источника объясняется различием в коэффициентах теплопроводности (λ) водо-, нефте- и газонасыщенных пород, что является поисковым признаком. Для дисперсных систем с ростом пористости теплопроводность уменьшается. Заполняющее поровое пространство (*жидкость и газы*) имеют более низкую λ (особенно газы), чем твердая фаза [53]. Заметим, что существует способ применения для идеализированной ТВТ модели одного из вариантов соотношения коэффициента пористости двухфазной среды для нефтяных формаций, заполнен-

ной флюидом (аналог формулы Шенкленда-Ваффа). Теплопроводность скелета среды (λ) и объемную концентрацию флюида (λ_{ϕ}), заполняющего поры, можно выразить отношением $\lambda = f \cdot k_{\pi} \cdot \lambda_{\phi}$, при условии $\lambda_{\phi} \gg \lambda_c$ (вмещающей среды). Для моделей со сложной геометрией порового пространства вводится коэффициент f , зависящий от доли сквозных каналов. К сожалению, точность подобных оценок невелика из-за отсутствия информации о том, какая часть каналов, заполненных раствором, образует сквозные пути для конвективного переноса тепла. Несмотря на примерную оценку, величина k_{π} является важнейшей обобщенной характеристикой осадочной толщи. Независимые сведения об изменении пластовой пористости и теплопроводности среды, полученные по диаграмме каротажа скважин, значительно повышают корректность решения задачи.

В местах расположения интенсивных положительных тепловых аномалий, разделенных между собой холодной зоной, происходит образование зоны растяжения с уступообразными участками, которые проявляются слабым градиентом поля. В этих местах условия накопления нефти отсутствуют в силу активной циркуляции водных флюидов. Области на уровне продуктивного горизонта, в которых присутствуют максимумы и минимумы аномальных значений локального распределения плотности потока, интерпретируются как не содержащие залежи УВ (рис.3.19). Основанием является различие тепловых свойств насыщающих породу флюидов (при одинаковой пористости пластов), которое имеет следующее соотношение теплопроводности: газ < нефть < вода.

Исходя из теории потенциала, учитывающей связь электрического и теплового полей, предлагается эвристический подход расчета относительного параметра среды, который способствует локализации залежи. С этой целью выбирается трансформированный двумерный слоистый разрез, в области возможного проявления углеводородов исходя из тепловизионных признаков. Сама область моделирования покрыта прямоугольной сеткой с множеством значений поля в ее узлах. Для горизонтального залегания пластов оценивается контрастность теплового поля выше и ниже лежащих слоев изотропного полупространства, путем расчета по латерали $f_1(x, y) = h/A_{max}$ и $f_2(x, y) = h/A_{min}$. Полученное отношение мощности пласта к амплитуде сигнала относят к его середине,

представляя слой в виде изменяющейся пленки по глубине. Фиктивные источники в среде, в которой изучается поле, не учитываются.

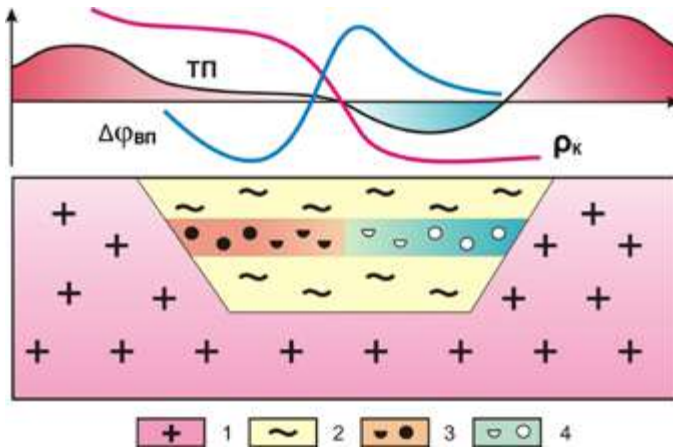


Рис. 3.19. Характеристика физических параметров модели структурно-литологической залежи углеводородов. Условные обозначения: 1 – породы фундамента, 2 – осадочный чехол, 3 – залежь углеводородов, 4 – водоносный слой. Графики аномалий ТП – локального теплового поля, $\Delta\varphi_{вп}$ – фазовой поляризуемости, ρ_k – удельного электрического сопротивления

В простейшем случае при соблюдении граничных условий нетрудно вычислить коэффициенты отражения от горизонтального раздела сред по формулам $K_{omp} = [f_2(x,y) - f_1(x,y)] / [f_2(x,y) + f_1(x,y)]$ и пропускания K_{np} имеющий вид $(1 - K_{omp}) = 2 f_1(x,y) / [f_1(x,y) + f_2(x,y)]$. При этом на большом расстоянии от залежи K_{omp} стремится к максимальным значениям, а в зоне наибольшей продуктивности к минимальным. Дефицит теплопроводности градиентных сред оценивается в (1.8–5)%. При наличии нескольких контрастных границ раздела берутся многократные отражения или прохождения теплового потенциала. Общая интенсивность поля в каждом случае равна произведению всех коэффициентов. Геометрическая локализация аномальных углеводородных пластов проводится путем изображения ряда графиков, которые указывают своей формой на местоположение объекта. Рассчитывается амплитуда послышной кажущейся тепловой анизотропии коллектора.

В соответствии с локально аномальным характером изменения ТП проводится ранжирование объектов на ряд типов: перспективные, с неясными перспективами и бесперспективные. Структурные зоны **первой категории** пространственно совпадают с геотермическими седловинами (участками с неопределенным направлением и малым градиентом векторов теплового излучения в местах сочленения положительных и отрицательных линейных тепловых потоков) и в пределах геотермических террас. Зоны **второй категории** (условно можно отнести к малоперспективным участкам) находятся в области высокого градиента графика ТП и не отвечают двум и более информационным признакам формирования углеводородов. Зоны **третьей категории** совпадают с геотермическим штоком (однородным, недифференцированным участком высокого теплового потока) или с термической ямой (участком, в котором сходятся отрицательные тепловые векторы, отрицательная часть геотермической ячейки).

На локальном уровне прогноза залежей углеводородов можно рекомендовать комплексный подход в изучении, используя интегральную информацию космической съемки с наземными электромагнитными зондированиями. Уровень обработки геофизических данных существенно отличается. В процесс исследования среды входит четыре составляющих поля: «естественное тепловое излучение» в диапазоне (0.4–14) мкм, «искусственное микроволновое поле» в радиодиапазоне 1мм – 1 м, «искусственное поле поляризуемости» в интервале (0.076–1.22) Гц, «естественное магнитотеллурическое поле» на частотах волн (1–10⁻³) Гц. Существующие системы обладают своими достоинствами и недостатками. Но совершенно очевидно, что полное использование всех данных электромагнитного поля позволит повысить эффективность в изучении среды – региональных и детальных геологических структур и зоны накопления нефти и газа.

В основу применения положены дистанционная спектральная съемка и электромагнитные методы в модификациях магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и дипольного зондирования вызванной поляризации (ДЗ-ВП) в частотном режиме. Методика анализа основана на извлечении информации о локальных аномалиях теплового поля, электропроводности, амплитудно-фазовых характеристиках поляризуемости

в диапазоне от 0.076 до 1.22 Гц и их пространственного соотношения на уровне продуктивного горизонта [33]. Изменение по профилю интервального сопротивления и поляризуемости зависит от фильтрационно-емкостных свойств пород, в частности, в зоне залежи УВ наблюдаются локальный рост ρ по МТЗ и отрицательная аномалия $\Delta\varphi_{\text{ВП}}$ по ДЗ-ВП.

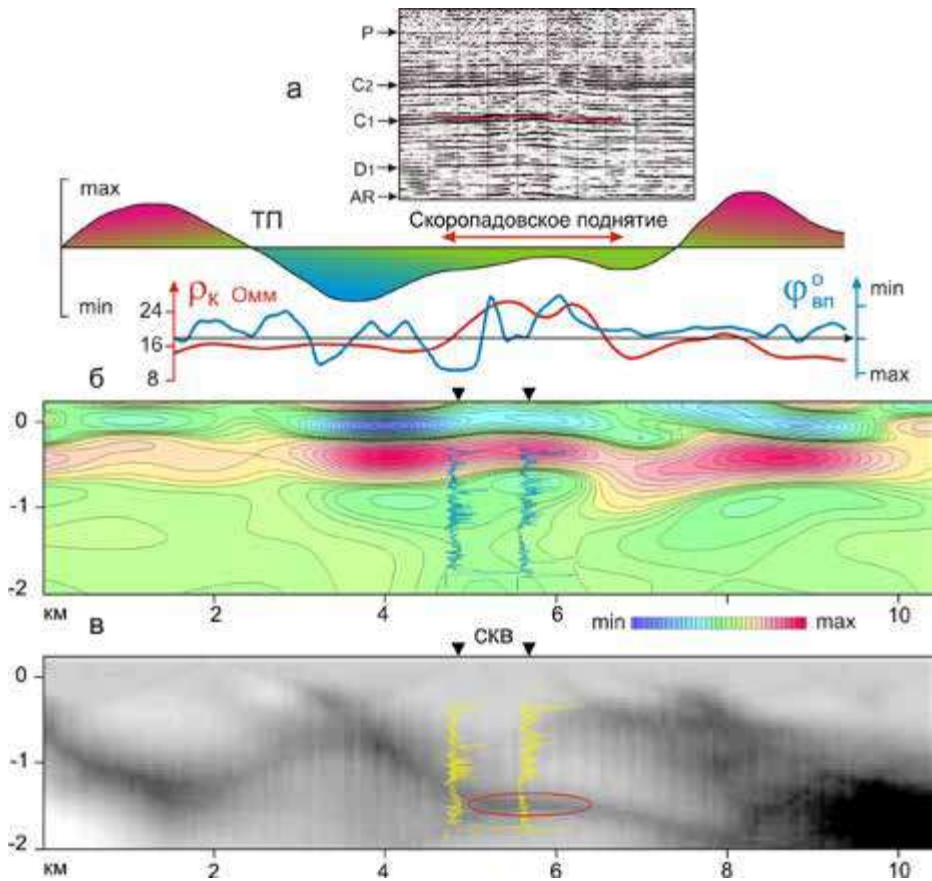


Рис. 3.20. Результат изучения Скоропаддовской структуры, в виде сейсмического разреза (а), моделей электромагнитного зондирования (б) и тепловизионной томографии (в)

Проиллюстрируем методику прогнозирования углеводородов в терригенных комплексах осадочного чехла Скоропадовского сейсмического поднятия (рис.3.20 а) на примере электромагнитного и тепловизионного зондирования. Оно расположено на южном окончании Крым-Сарайской валообразной зоны ЮТС. Структурные планы палеозойского осадочного чехла в зависимости от комплекса осадков, условий и времени формирования носят различную степень связи с рельефом фундамента. Простираение и конфигурация структур чехла в основном отвечают разломно-блоковому строению фундамента и опосредованно его внутренней структурно-вещественной неоднородности.

Комплексом электромагнитных методов в модификациях МТЗ и ДЗ-ВП проведена оценка наличия углеводородов сейсмической структуры малой амплитуды по кровле нижнего карбона [33]. Для этого построены геоэлектрические модели МТЗ в изолиниях значений сопротивления второго порядка $\Delta\rho$ и графики ДЗ-ВП ρ и $\Delta\varphi_{\text{ВП}}$, глубинным расчленением разреза по электропроводности и поляризуемости. В частности, в реальных геоэлектрических средах признаком насыщения пород УВ являются возрастание ρ над центральными частями контура на фоне общего уменьшения электрического сопротивления, образование локальных аномалий повышенной поляризуемости на глубине, в зоне расположения продуктивного горизонта, а также возрастание градиента продольной проводимости в аномальной области поднятия. Признаком насыщения пород другим флюидом, или изменения литологии, является обратная зависимость поляризуемости от сопротивления. Эти характерные электрические особенности проявления насыщения флюидом дают возможность оценить нефтеносность изучаемого поднятия на различных глубинах и тем самым уточнить перспективы отдельного структурного этажа.

Глубокая скважина, пробуренная в купольной части Скоропадовского поднятия, подтвердила по материалам геофизических исследований скважин залежи нефти в интервале 1259–1270 м, что соответствует положениям турнейского яруса нижнего карбона. В результате испытания другой скважины, расположенной на северо-западном крыле Скоропадовского поднятия, получен приток дебитом 10 т/сутки. Из них приток 8 т/сутки нефти из карбонатного пласта турнейского яруса и 0.35 т/сутки

из отложений бобриковского горизонта. Таким образом, по данным комплекса исследований, обе скважины находятся в зонах проявления признаков насыщения пород УВ. Перспективные зоны имеют локальное распространение и малые размеры.

Модель МТЗ (рис.3.20 б), построенная в изолиниях удельного электрического сопротивления, характеризуется ярко выраженным рисунком поля. Осадочный чехол представлен четырьмя слоями. Первый слой горизонтально выдержанный, глубиной до 300 м имеет сопротивление 10–15 Ом·м. Второй слой с сопротивлением 20–50 Ом·м находится в интервале 0.3–0.8 км. Сопротивление третьего слоя глубиной до 1.6 км меняется от 5 до 10 Ом·м. В последнем слое до 1.8 км наблюдается рост сопротивления до 50 Ом·м. Характер изолиний ρ МТЗ по профилю описывает высокоомный блок фундамента в пределах ПК 5–7 км, ограничиваемый с обеих сторон небольшими прогибами. По данным магнитотеллурических зондирований, Скоропадовское поднятие является унаследованным от фундамента, что подтверждается результатами ранее выполненных сейсмических работ.

Основным признаком прогнозирования нефтеносности с помощью ТВТ является получаемый эффект над залежью углеводородов в виде зоны слабого градиента локального аномального поля, которая определяет степень отличия продуктивной части пласта от вмещающих пород. В свою очередь, модель блоково-разломных структур (рис.3.20 в) отображает геометрию структурных зон: поднятия на уровне кристаллического фундамента в виде аномально плотных блоков пород; области разуплотнения слоев, как правило, совпадающие с пониженными значениями электрического сопротивления каротажа скважин; участки латерального изменения интенсивности теплового поля, проявляющиеся в виде затемненных зон и сопоставимые с областями минимального продольного сопротивления, которые подчеркивают в разрезе границы раздела сред и геометрию объектов. Разрез представлен преимущественно карбонатным составом пород, поэтому на модели блоково-разломных структур разуплотнения выглядят маломощными горизонтальными зонами (овал красного цвета). Они хорошо совпадают с минимумом диаграммы каротажа скважин, которая совмещена с рисунком поля. Места повышенных значений сопротивления отвечают плотным блокам пород, выделяемых

по тепловизионным данным. Следовательно, предлагаемые нами признаки проявления нефтеносности осадочного чехла в тепловизионных характеристиках поля находят хорошее подтверждение в комплексных геофизических исследованиях.

Способ выявления залежей углеводородов также основан на извлечении комплексной информации о пространственной и временной динамике нормализованных спектральных параметров состояния растительности и почв (ISN , IWN) в увязке с глубинным строением геологической среды. Это дает дополнительную геохимическую информацию, которая отражает аномальное воздействие углеводородов и подземных вод на верхнюю часть разреза. Глубинные тектонические нарушения рассматривают как систему природных подводящих каналов для миграции к поверхности флюидогазовых эманаций, которые образуют участки перетоков флюидов в проницаемых средах и накопления в пористых средах в форме многоэтажных камер. Масштаб влияния углеводородных скоплений различен и зависит от степени равновесного состояния с окружающей геологической обстановкой. Протекание активных гидродинамических процессов, участвующих в формировании или разрушении залежей, приводит к нарушению этих связей.

В качестве примера приведем результаты прогнозирования нефти в терригенных комплексах Жигулевско-Пугачевского свода Средневожской нефтегазоносной области Волго-Уральской провинции. Из общей характеристики площади в 1350 км^2 по ТВТ на бесперспективные участки приходится 395 км^2 , что составляет 29%, а на перспективные – 112 км^2 , или 8.3%. Исходя из структурной «насыщенности» (плотности структур) нами установлено 60 объектов (одно поднятие приходится на $15\text{--}30 \text{ км}^2$). Их площадь изменяется от 0.26 до 7.4 км^2 . В этом случае значение медианы достигает $S=1,2 \text{ км}^2$, что указывает на категорию карликовых месторождений с малым запасом углеводородов. Этот информационный продукт позволяет минимизировать затраты на геофизические работы.

Проводилось сопоставление моделей тепловизионной томографии с сейсмическими разрезами по горизонту C_{1fl} с изогипсой -920 м , которая выявила перспективное на нефть Марьевское поднятие. Тип структуры – седиментационный (рис.3.21). Установлены закономерности в форми-

ровании перспективных объектов и линейных структур пониженного теплового поля, отражающее местоположение водонефтяного контакта. По мере убывания интенсивности поля происходит сужение, выклинивание зон, на склоне которых появляются перспективные участки на поиск УВ. Относительно приподнятые блоки – благоприятные условия для концентрации УВ – непосредственно прилегают к зонам перетоков флюидов.

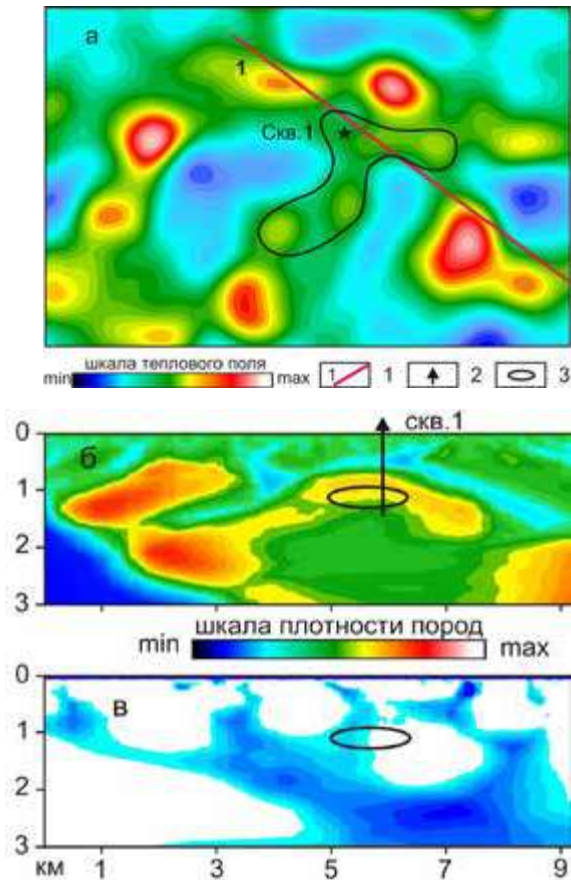


Рис. 3.21. Карта-срез локального теплового поля на глубине 1 км (а), модели блоково-разломной (б) и зон гомогенности (в) Марьевской структуры Жигулевско-Пугачевского свода. Условные обозначения:
1– геотермический профиль; 2 – местоположение скважины;
3 – контур нефтеносности

Геотермические этажи отмечаются динамическими устойчивыми отражающими площадками, вертикальное изменение тепловых свойств пород проявляется слабым нарушением в корреляции сейсмических границ. По тепловизионным исследованиям зона насыщенности нефтью коллектора незначительно смещена относительно центра структуры и относится к группе облегания. Продуктивный пласт выклинивается в сторону свода структуры. Поэтому рекомендуемое местоположение поисковой скважины является борт купола. При испытании пробуренной в 2010 году разведочной скважины №1 в интервалах 1002–1004 и 1008–1010 метров получен приток безводной нефти из пласта бобриковского горизонта дебитом 3 м³/сутки.

Следует напомнить, что увеличение объема открытой трещиноватости происходит не по всей толще, а по горизонтам, имеющим наименьшие прочностные характеристики. По глубинным зонам тепло распространяется наклонно вверх в виде флюидогазовых эманаций. Вблизи разломных зон, состоящих из повсеместно иерархически соподчиненных систем с затуханием до перспективных стратиграфических горизонтов чехла, формируются благоприятные условия для скопления УВ. В этом случае возникают геологические ситуации, при которых оперяющие разломы либо сходятся в пространстве, обуславливая систему сжатия блоков, либо расходятся, создавая зону растяжения (*разуплотнения*) блоков. В тектонических нарушениях, имеющих региональный характер залегания и пронизывающих толщи фундамента и чехла, формирование ловушек УВ маловероятно из-за нарушения целостности среды.

В контексте наших размышлений о природе горизонтального расслоения и вертикальной раздробленности среды, согласно тепловой модели, наибольшее влияние на прочность и реологические свойства аномальных зон оказывает природный флюид. Раздробленная среда с высоким поровым давлением воды напрямую отражается в уменьшении скорости прохождения потока теплового излучения. При сдавливании пород горизонта и низком поровом давлении среда консолидируется, массы воды устремляются вверх. Это затрагивает в большей мере глубинные геотермические этажи, в которых динамическое неравновесное состояние флюидов обуславливает прерывистый характер блоков. Выстраивающаяся в плане цепочка изометричных холодных зон указывает на су-

ществование линейной зоны различного простираия. Местоположение залежей подземных вод определяют по пространственному сочетанию следующих признаков – минимальные значения изолиний плотности потока теплового излучения в разрезе блоково-разломных структур на уровне продуктивного горизонта и наименьшие параметры нормализованных индексов состояния растительности и почв в местах выхода флюида на поверхность Земли. Наибольшие значения теплового потока в разрезе блоково-разломных структур, совпадающие с максимумами графиков индексов ISN и IWN, которые построены для земной поверхности, интерпретируют как зоны, не содержащие залежи подземных вод.

Многочисленные исследования различных регионов мира позволили выявить признаки условий для накопления УВ в осадочном чехле. К ним можно отнести строение регионального и локального теплового поля, планового изменения интенсивности холодных локальных зон, особенности формирования глубинных структур, характеристика блоково-разломной тектоники (*с ранжированием оперяющих разломов на геодинамические активные зоны перетоков и накопления флюидов*). В качестве термодинамических критериев выделения перспективных зон служат:

- в местах расположения крупных нефтегазовых месторождений имеются выходы глубинных геотермальных зон разуплотнения земной коры;
- расположение геологических объектов вблизи восходящих линейных тепловых потоков, но вне геотермических холмов, где сохранность покрышек маловероятна;
- наличие асимметричных козырьков на моделях теплового поля для интервала потенциально нефтегазоносных глубин; козырьки нарушают общий план горизонтально-слоистого разреза и представляют собой структуру пород чехла, в которой образуются локальные участки холодных зон, перекрытые более теплыми отложениями;
- ситуация встречного направления отрицательных и положительных векторов теплового потока;
- резкие латеральные отклонения тепловых потоков от вертикального направления, связанные с геологическими объектами;
- расположение геологических объектов вне геотермических ям и отрицательных линейных потоков;

- аномальная пространственная и временная динамика нормализованных спектральных параметров состояния растительности и почв;
- относительно более высокое гипсометрическое положение прогнозируемого геологического объекта.

По признакам объемных моделей можно судить о геотермических ловушках углеводородов, устанавливать качество непроницаемых покрышек и зон накопления флюидов, определять наличие разрывных нарушений через трассирование зон разгрузки глубинных вод, их влияние на сохранность залежи. В совокупности это позволяет определить наиболее вероятные контуры и глубину залегания залежей природных углеводородов и рекомендовать для бурения проектную скважину.

3.4. Поиск залежей нефти в терригенном осадочном комплексе Южно-Татарского свода

Рассматриваемое Ульяновское сейсмическое поднятие расположено на западном склоне Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Современный структурный план региона сформирован разновозрастными и разнонаправленными тектоническими движениями. Следы тектонических процессов отображаются по основным структурным горизонтам в виде протяженных зон флексур, валов, прогибов и уступов. Валообразные зоны трансформируются в блоки и гряды (*разделенные узкими, сравнительно неглубокими прогибами*), сохраняя при этом основные морфологические характеристики. Южно-Татарский свод имеет различия в глубинном строении со смежными структурно-формационными зонами, например с Мелекесской впадиной. Блочность и раздробленность в строении ЗК больше свойственна верхним горизонтам. Расслоение слоев связано с изменением литофизического состояния пород и проявлением глубинного метаморфизма. Интенсивные положительные полосовые тепловые аномалии широтного простирания в плане совпадают с ранее выявленными валообразными структурами. Валы являются современными структурными зонами, переработанными и спаявшимися в процессе развития разновозрастные блоки в теле фундамента.

Известными условиями для образования месторождений является наличие источника углеводородов и присутствие пар коллектор–покрышка. Геологическое строение района свидетельствует в пользу широкого распространения терригенных коллекторов и покрышек на уровне каменноугольной системы. Так как наиболее вероятно нефтяные залежи связаны со структурным типом ловушек, то геотермические седловины и карнизы являются основными перспективными объектами, что служит хорошим поисковым признаком. Продемонстрируем результаты локализации углеводородов в терригенном комплексе (рис.3.22–3.23).

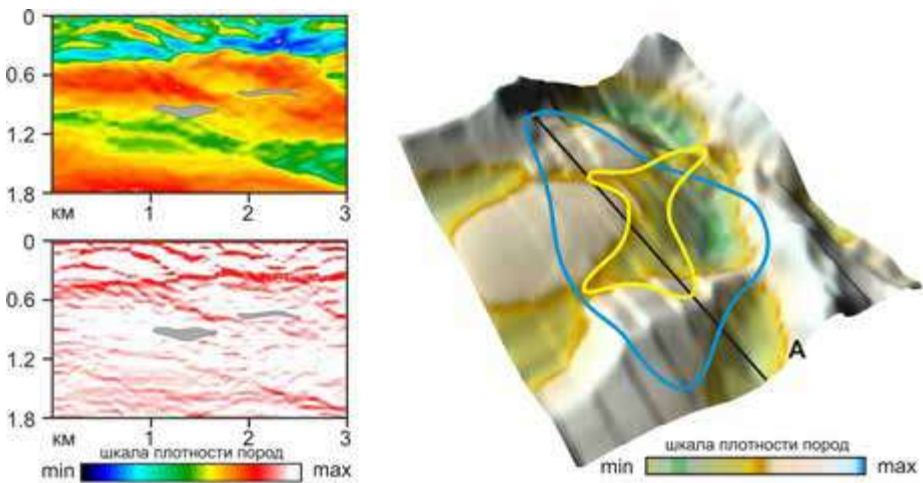


Рис. 3.22. Разрез по профилю А и объемная модель блоково-разломной Ульяновской структуры ЮТС

Методика основана на извлечении информации о локальных аномалиях теплового поля и пространственного соотношения дифференциальных параметров. Разрезы могут быть экспортированы в сейсмические модели, что позволяет оптимизировать процесс построения геологических моделей и их дальнейшее сопровождение при интерпретации. Создается эффективная поддержка многовариантности данных. Результат последнего шага – точный прогноз миграции и скопления углеводородов. Нами локализована зона вероятного местоположения залежи, что позволило оценить глубину залегания в -960 м. Последующее бурение сква-

жин в установленном контуре тепловизионной томографии подтвердило наше заключение и перспективы нефтеносности отложений среднего и нижнего карбона. Добыча по скважинам составила 2–12 м³ в сутки.

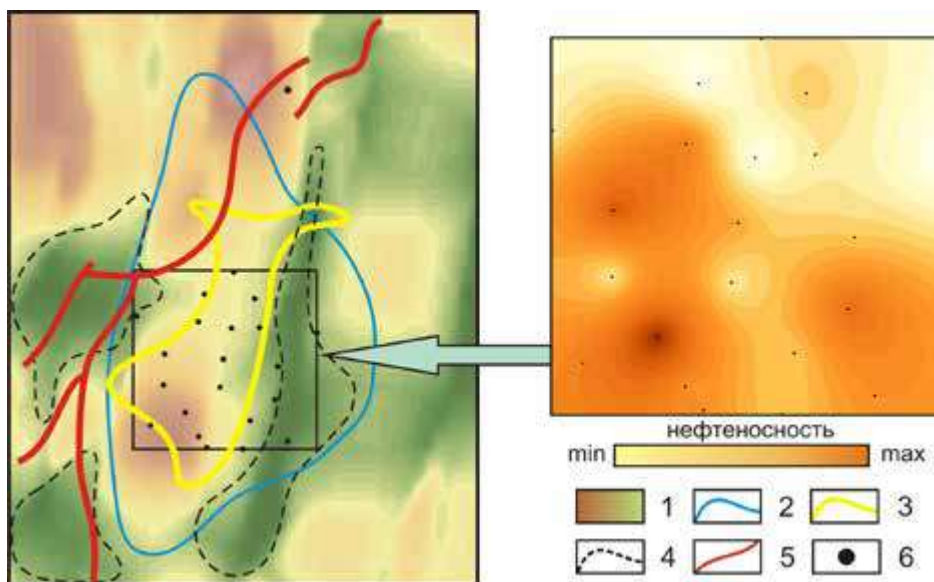


Рис. 3.23. Карта-срез трещиноватости коллектора терригенного карбона Ульяновской нефтяной структуры. Условные обозначения:
 1– зона трещиноватости; 2 – граница сейсмического поднятия;
 3 – контур продуктивных отложений по тепловизионной томографии;
 4 – слабо перспективная зона; 5 – региональный разлом; 6 – скважина

3.5. Формирование залежей углеводородов в Гвинейском заливе

Объектом исследования является фрагмент бассейна Rio Muni, расположенного в Гвинейском заливе Атлантического побережья Западной Африки. Он состоит из сегментов коры, сформированных в меловой период и погружающихся на запад. Бассейн показывает сильные сходства в тектонике и стратиграфии со смежными зонами. Проявление современного вулканизма и тектонических движений на территории создало определенные трудности в концепции поиска углеводородов. На боль-

шей части бассейна выполнена сейсморазведка с бурением глубоких скважин. Однако, как показывает практика, результативность геофизических работ очень низкая.

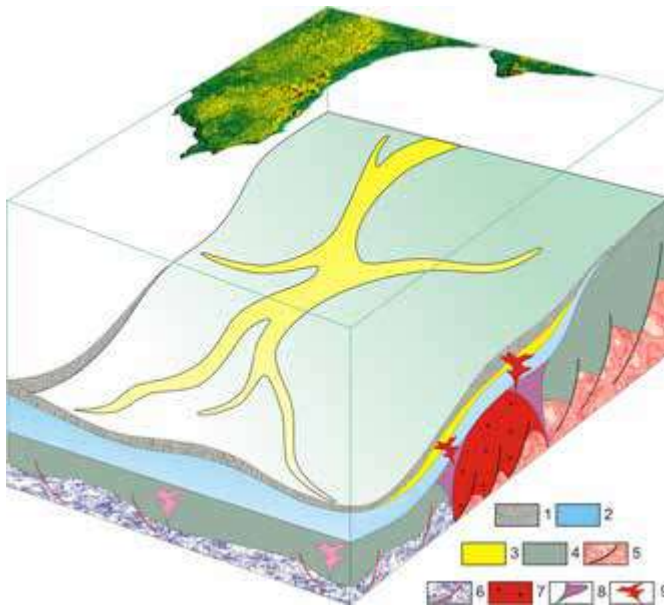


Рис. 3.24. Объемная модель формирования земной коры бассейна Rio Muni. Условные обозначения: 1, 2 – породы осадочного чехла; 3 – зоны русел палеорек; 4 – метаморфизованный слой; 5 – блоково-разломные структуры континентальной коры; 6 – океаническая кора; 7 – вулканогенные образования; 8 – рифтовые структуры; 9 – интрузивные тела

Масштабность использования дистанционных методов при съемке, широкий круг геологических задач, их разноплановость и проблемность потребовали от нас привлечения многозональных космических снимков разной разрешающей способности. По данным 3D-ТВТ установлено, что формирование продуктивных резервуаров углеводородов в материковой окраине и морской части Экваториальной Гвинеи связывается с проявлением ряда природных факторов (рис.3.24):

- развитием региональной рифтовой структуры Venito, по образованным каналам происходила вертикальная и горизонтальная миграция УВ в среде;

- наличием крупных непроницаемых вулканогенных построек, в краевых частях которых образуются линзовидные участки пористого песка, создающие условия для накопления углеводородов;
- образованием врезов русел палеорек, являющихся сложно построенными рукавообразными структурами чехла в оффшорной зоне, оказывающих содействие латеральной миграции УВ;
- развитием разного масштаба грабенов, простирающихся параллельно современной береговой линии залива и совпадающих с тектоническими разломами, которые создают структурно-литологические залежи УВ;
- возникновением рифовых (биогермных) построек в глубоководных областях океана, которые не сформировались в обособленное массивное известковое образование, а отложились в виде слоев.

В огромном большинстве случаев ТВТ показывает, что созданные в литосфере аллохтонные литопластины и разломы оказывают существенное влияние на плановое размещение месторождений углеводородов. Определены геологические факторы, контролирующие развитие залежей. Глубинными признаками их формирования является приуроченность участков к крупным субвертикальным зонам разуплотнения земной коры. По ним происходит перемещение флюидов и их концентрация в структурах осадочного чехла при наличии ловушек и покрышек. Ранее определены условия осадконакопления на большей площади шельфа. В нижней части формации преобладают континентальные косослоистые алевролиты и песчаники, подчиненное значение имеют галечные конгломераты и глинистые алевролиты. В верхней части чехла главное значение имеют грубозернистые и массивные слои несогласного залегания.

Строение рифта Venito по данным 3D-ТВТ. Впервые изучены регионально-клиновидные структуры рифта, включающие зоны разной плотности, уходящие на многие сотни километров. На рис.3.25 а изображен поперечный разрез континентальной части структуры Venito. Сечение рифта состоит из двух уровней тепловой слоистости: аномальной локальной областью разуплотнения на глубинах 6–10 км, сходящимися к ней разломами листрической формы; региональной зоной земной коры на глубинах

18–30 км, относительно которой формируются крылья проницаемых слоев под углом до 230. В основании коры на глубине 30 км располагаются блоки, контролирующие положения границы кора-мантия. Однако существуют наклонные контакты между блоками (рис.3.25 б), с меняющейся мощностью от 5 до 10 км. Выходы внутрикоровых зон на поверхность могут служить индикаторами перспектив отдельных участков на УВ. Объект имеет в целом тренд к северо-западу и юго-западу на разрабатываемые в настоящее время нефтяные месторождения OKUME и CEIBA. Оконтуривание продуктивных поясов может положить начало открытия новых нефтяных месторождений.

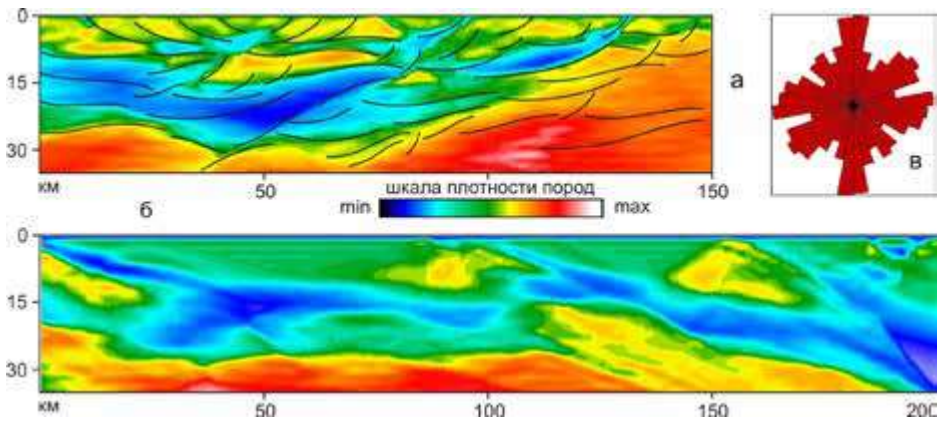


Рис. 3.25. Модель коры рифта Venito на континенте (а) и шельфе (б), роза-диаграмма разломов (в) бассейна Rio Muni Экваториальной Гвинеи

Разломы формируют многообразное направление (с преобладанием север-юг) региональной трещиноватости блоков коры региона (рис.3.25 в). Такая ситуация требует всестороннего изучения тепловых свойств пород фундамента, исследования характера распределения и формирования трещинных систем, закономерностей размещения залежей в коллекторах *нетрадиционного* типа. Очевидно, это обстоятельство приводит к необходимости разработки критериев оценки перспектив нефтегазоносности кристаллического фундамента и созданию научных основ поиска трещиноватых коллекторов коры на шельфе, которые имеют аналоги в мировой практике (*Кыулонгская впадина Южного Вьетнама, месторождение Белый Тигр, Дракон, Черный Лев, Заря*).

Вулканические структуры в оффшорной зоне Rio Muni. Проявление вулканических тел в осадочном чехле и фундаменте может объяснить общую проблему аккумуляции нефти и газа, причину исчезновения крупных нефтяных проявлений на лицензионном участке. Несомненно, в ряде случаев существование зоны плотно сцементированных пород и непроницаемые поверхности тектонических нарушений создают вид кольцевых поднятий. Своды имеют меньшую мощность вышележащих осадков и влияют на условия образования коллекторов. Подобная картина изображена на рис.3.26 с повышением интенсивности теплового поля изометричного очертания. В границах погребенной вулканической постройки общий структурный план разломной тектоники принципиально не отличается от морфологии поверхности фундамента. Однако располагается центральный грабен как раз над вершиной структуры. Он имеет широтное простирание отложений, совпадая с направлением к источнику питания обломочным материалом. Приведенные ортогональные разрезы показывают, что корневая часть структуры находится на большой глубине, тем самым доказывая существование реликта купола. По его периферии образуются сбросы сложного строения, крутого падения слоев, создающие продуктивные резервуары. Тепловые модели дают сведения о реологическом состоянии пород, необходимые для построения структурных карт. При корреляции разрезов ТП очень полезно знать точные сведения опорных горизонтов.

При размещении скважин на структурах данного типа необходимо обращать серьезное внимание на термодинамическую обстановку блоков. В своде вулканогенной постройки глубокая скважина RioMuni-1 залежь нефти не выявила. В результате бурения последующих четырех скважин на южном крыле поднятия вскрыты слабые признаки УВ только в скважине Р-4. По-видимому, установлена краевая часть залежи, размеры которой остаются неясными. Залежь относится к структурно-литологическому типу, залегает на небольшой глубине. Результаты показывают, что большая часть структуры насыщена водой и нефтяная залежь является менее мощной.

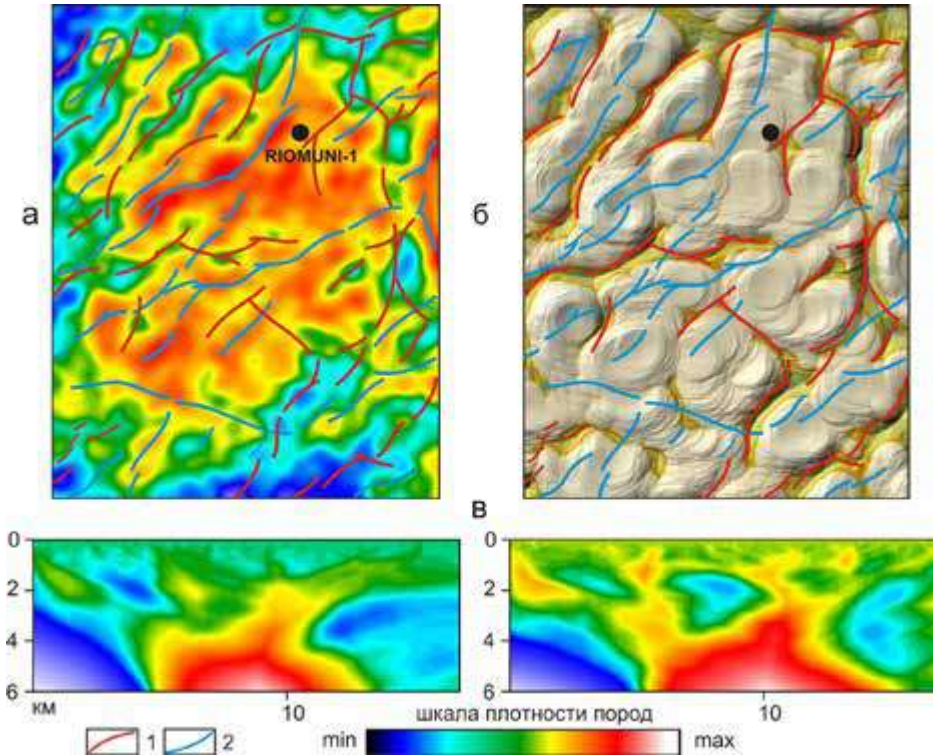


Рис. 3.26. Карта-срез теплового поля (а) и модель блоково-разломных структур (б) на целевой глубине залежи УВ, разрезы вулканогенной постройки (в) через скважину РиоМуни-1. Условные обозначения: 1– зона разлома; 2 – ось однородности среды

Концепция поиска сложно-построенных рукавообразных структур.

По мере увеличения изученности продуктивных отложений в районах развитой нефтедобычи, сокращения фонда выявленных и подготовленных к бурению антиклинальных структур, имеющих сравнительно простое строение, все более актуальной становится проблема прогнозирования и поисков углеводородного сырья, связанная со сложно построенными (нетрадиционными) ловушками, которые являются одним из резервов добычи нефти. Анализ геологического материала по разрезам Гвинейского залива свидетельствует о том, что терригенные комплексы формировались в условиях, благоприятных для образования сложных ловушек.

Палеотектоническая обстановка накопления осадков отличалась неоднократным проявлением трансгрессий и регрессий морского бассейна. В относительно активное тектоническое время устанавливалась неустойчивая гидродинамическая обстановка с неопределенным положением береговой линии, создававшей значительную литолого-фациальную изменчивость накапливающихся осадков, замещения проницаемых разностей непроницаемыми на коротких расстояниях. Это способствовало формированию сложно построенных ловушек – рукавообразных (*шнурковых*), линзовидных и баровых.

Геологический прогноз возможных зон развития сложных ловушек в нижней части разреза осадочного чехла и в конечном итоге обоснование направлений работ по их поиску в настоящее время мало поддается научным разработкам в основном из-за отсутствия сколько-нибудь заметных закономерностей в их распределении. Использование для указанных целей литолого-фациальных карт часто оказывается малоэффективным из-за неопределенного положения береговой линии.

Уверенное прогнозирование даже наиболее простых и широко распространенных поисковых объектов, связанных с выклиниванием проницаемых пластов-коллекторов на локальных поднятиях, в районах недостаточно изученных глубоким бурением, часто крайне ограничено. Для успешного решения вопроса поиска сложных ловушек за счет поисково-разведочного бурения требуется немало затрат и времени. Как показала практика, сейсмические методы в этих условиях малоэффективны.

Палеогеографические условия осадконакопления предопределялись развитием рифтовой системы некомпенсированных прогибов, а также эрозионных врезов в их прибортовых частях, способствовавших образованию осадков, резко изменчивых на коротких расстояниях, по мощности и простираию. Последние были благоприятны для накопления прибрежно-аккумулятивных песчаных тел. Роль песчано-алевролитовых пород, заполняющих зоны врезов, как каналов латеральной миграции углеводородов, очевидна. С песчаными телами древних водных потоков (*русел палеорек*) – рукавообразными или шнурковыми, а также прибрежными песчаными образованиями бассейнов седиментации (*валами, баррами*) могут быть связаны скопления углеводородов литологического типа.

Целенаправленные поисковые работы выявления нетрадиционных ловушек на шельфе Гвинейского залива до последнего времени практически не выполнялись, поскольку основными объектами нефтепоисковых работ были антиклинальные структуры. Сложные ловушки выявились случайно, поэтому зоны возможного их развития до настоящего времени недостаточно изучены. Это можно объяснить в определенной степени крайне ограниченным использованием мало затратных несеизмических технологий.

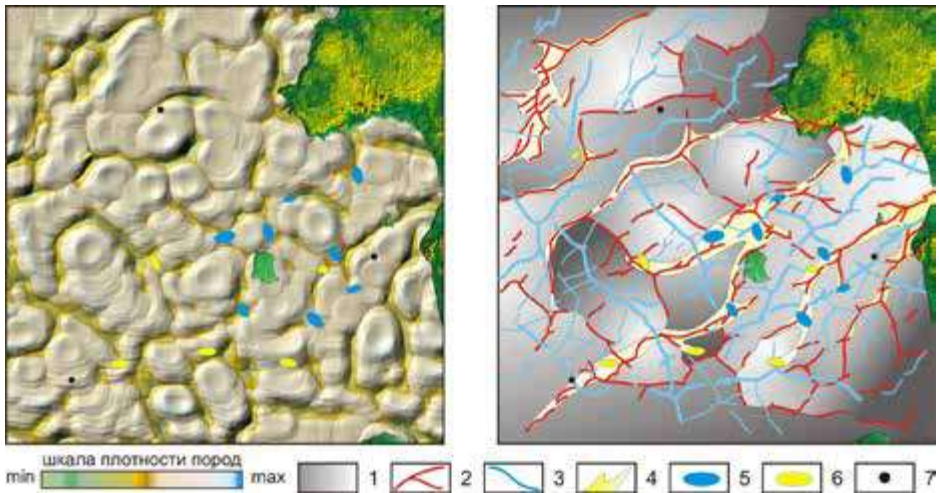


Рис. 3.27. Региональные черты осадконакопления бассейна Rio Muni Экваториальной Гвинеи: а – модель блоково-разломных структур коры; б – районирования морских и континентальных условий накопления осадков. Условные обозначения: 1 – блок чехла; 2 – разлом; 3 – ось структуры; 4 – русло палеореки; 5 – зона перспективной ловушки УВ; 6 – условно перспективная ловушка; 7 – скважина

Сложные ловушки весьма разнообразны по своему происхождению и морфологии, формируются в ходе процесса литогенеза осадков при наличии латерального экрана, структура и генезис которого различны. Самая распространенная группа нетрадиционных ловушек – литологические, которые формировались вследствие изменения состава пластов, происходящего в процессе седиментации. Замещение фаций выражает-

ся в переходе проницаемых разностей в непроницаемые породы или в выклинивании высокочемких пластов. Литологические ловушки можно подразделить на баровые, рукавообразные (шнурковые), линзовидные, выклинивающиеся вверх по восстанию пластов (рис.3.27).

К ловушкам рукавообразного типа отнесены песчаные тела удлиненной формы с прогнутым или плоским основанием в поперечном сечении. Они образовывались путем заполнения грубозернистыми осадками различных палеоструктурных форм, таких как русла, рукава, дельты и авандельты. Скопления нефти в таких ловушках часто формируются в местах пересечения структурных осложнений нижележащих горизонтов рукавообразными песчаными телами увеличенной мощности, которые, в свою очередь, облекаются продуктивными горизонтами, содержащими промышленные скопления нефти. Отложения самих потоков, несомненно, имеют пресноводное происхождение.

Отличительным признаком подобных отложений являются их извилистые очертания, вырисовывающие путь древнего русла. Бурение скважин по линиям простираия выявленных песчаных тел, безусловно, приведет к обнаружению нефтяных залежей. Экспресс-анализ ТВТ нами проведен для одного среза 1750 м, а на рисунке показаны хорошие ловушки для нефти, но не все перспективы площади.

В мелководно-морском бассейне формировались преимущественно песчано-глинистые образования. Строение блоково-разломных структур свидетельствует о том, что в течение длительного времени погружение отдельных участков региона сменялось поднятиями. Поэтому ряд зон в глубоководной части относятся к условно перспективным ловушкам УВ. Совершенно очевидно, что продуктивными нефтеносными осадками могут являться несколько горизонтов, увеличивающих мощность по направлению к области сноса.

Эффективность поисков и разведки сложно-построенных ловушек может быть существенно повышена за счет более широкого использования тепловизионного зондирования и комплексной интерпретации материалов. Предпосылкой для применения 3D-ТВТ является тот факт, что ловушки углеводородов представляют собой по микроструктуре поля контрастные геологические объекты по сравнению с окружающей сре-

дой. Основой подхода к истолкованию полученных геофизических материалов является представление о связи петрофизических характеристик и физических моделей среды с тектоникой, структурой, литологией и фильтрационно-емкостными свойствами геологических объектов. Рубчатый, полосовидный, линзовидный характер потока теплового поля отображают лито-физическую зональность терригенных пород. Отложения в этих зонах представлены грубозернистыми песчаными образованиями, обладающими повышенными фильтрационно-емкостными свойствами.

Для изучения сложно-построенных ловушек (литологическо-ограниченных) в нижней части осадочного чехла благоприятны активные зоны разломов, выделяемые в основном по данным тепловизионного зондирования. С ними связаны участки резкого изменения свойств пород. Контрастность песчаных пластов в деструктивных зонах часто усиливается высокоминерализованными глубинными водами, поступающими из проницаемых трещиноватых пород кристаллического фундамента и насыщающих грубозернистые образования осадочного чехла.

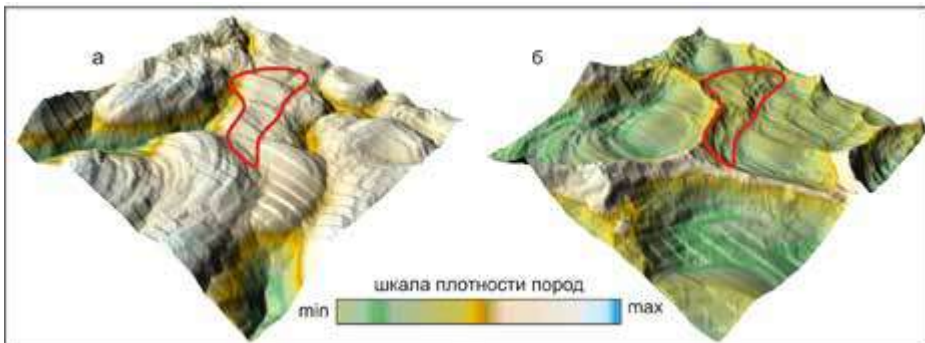


Рис. 3.28. Объемная модель перспективной линзовидной залежи УВ бассейна Rio Muni: а – фрагмент строения блока; б – гомогенность структуры чехла

К числу актуальных задач по освоению неразведанных ресурсов нефти относится и картирование древних высокоамплитудных тектоно-эрозионных выступов – останцов фундамента. Древние выступы прогнозируются по ТВТ при комплексном анализе. Трансгрессивное налегание нижних горизонтов осадочного чехла на тектоно-эрозионную поверх-

ность фундамента создает определенные предпосылки для формирования на склонах выступов ловушек, песчаные коллекторы которых можно спрогнозировать по ТВТ.

Характерные черты локального образования осадков приведены на рис.3.28 в виде контура целевой залежи, расположенного на глубине 1750 м. Отметки воды в оффшорной зоне достигали 100 м. Площадь перспективной структуры оценивается в 18 км², залежи – 10 км². По априорным данным, эффективная мощность коллектора 20–30 метров с пористостью 20%. Геологические запасы оцениваются в 90 млн баррелей. Основной геологический риск – качество покрышки и коллектора.

Следовательно, метод 3D-ТВТ позволил расширить представления об особенностях строения терригенных отложениях шельфа Гвинейского залива Экваториальной Гвинеи недостаточно изученной глубоким бурением. Результаты разноплановых геофизических и палеотектонических исследований в прибрежной зоне дают прогноз закономерностей размещения песчаных аккумулятивных форм с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами, древних выступов фундамента тектоно-эрозионного типа, выделить перспективные зоны развития сложно-построенных ловушек нефти (*шнурковых, рукавообразных*), тем самым обоснованно подойти к региональной оценке перспектив нефтеносности со структурно-тектонических позиций.

Концепция поиска состоит в детальном изучении особенности строения осадочного чехла и фундамента. Установлено, что область формирования крупных месторождений УВ Гвинейского залива контролируется глубинными тектоническими нарушениями, по которым происходит тепловое воздействие на среду, магматические процессы, формирование грабен. Необходимо изучать региональное тектоническое строение среды, в частности, разломы (*вертикальные, листрические*), геоблоки (*локальные – региональные, приподнятые – опущенные, однородные – неоднородные*), магматические образования (*состав, форма, размеры, корневые – без корневые*). Совокупность полученного информационного материала, теоретическое обоснование, разработка и опробование методики прогнозирования нефтегазонасности в условиях развития сложно-построенных нетрадиционных типов ловушек (*которые являются*

одним из неиспользованных резервов прироста запасов нефти) позволяют нам рекомендовать к широкому использованию технологию 3D-TBT поисков углеводородов.

3.6. Оценка перспектив бурения глубоких скважин на шельфе моря

Рассмотрим результаты ТВТ по фрагменту геосинклинального пояса Калимантан-Сулавесского нефтегазоносного бассейна в Юго-Восточной Азии. В тектоническом строении кора характеризуется большой мощностью молодых, преимущественно терригенных, отложений и интенсивной складчатостью фундамента. Степень дислоцированности слагающих пород снижается в погруженных частях моря. Крупные залежи УВ региона приурочены к линейно ориентированным антиклиналям осадочного чехла.

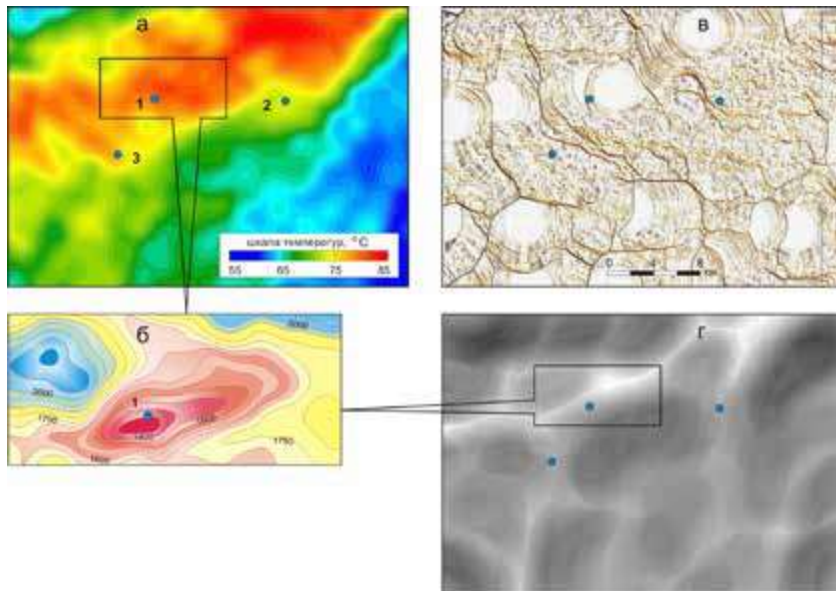


Рис. 3.29. Результаты ТВТ в виде теплового поля среды (а), дифференциальной схемы блоково-разломных структур (в) и гомогенности модели (г) на глубине 1.8 км, фрагмент сейсмической структуры (б)

Исследования строения оффшорной зоны выполнено методом тепловизионной томографии геологической среды на основе спектрозональной космической съемки. Цель изучения – оценка перспектив лицензионного блока до начала глубокого бурения проектной скважины №1. Методом устанавливалась закономерность изменения эндогенного теплового поля в пространстве и выявлялась зональность структур в связи с формированием залежей углеводородов. В процессе интерпретации ТВТ материалов выявлены геотермические признаки наличия УВ, выполнено картирование природных каналов и зон трещиноватости пород, в состав которых входят области миграции и накопления флюидных и газовых эманаций.

В качестве исходных данных для детальных тепловизионных исследований при оценке перспектив бурения глубокой скважины 1 использованы космические снимки Landsat-8. Для наглядности восприятия информации приведены карты для фрагмента блока площадью 830 км² (рис.3.29).

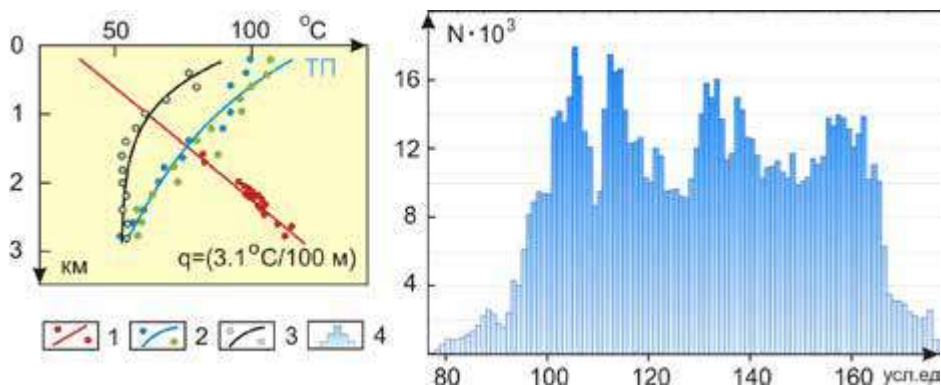


Рис. 3.30. Корреляционная характеристика теплового поля с глубиной. Условные обозначения: 1 – температура по скважинам; 2 – медиана ТП для геотермического штока и переходной зоны; 3 – медиана для всего блока; 4 – гистограмма интенсивности источников на глубине 1.8 км

Экспериментальная корреляционная зависимость температуры от глубины, установленная по термометрии ряда скважин, оказалась полезной для дальнейшего преобразования модельного поля тепловых источников в численные значения $T^{\circ}\text{C}$ (рис.3.29 а). Процесс пересчета выполнен с учетом статистического разброса теплового излучения по латерали. В

построениях использовано более 920 тыс. значений по заданному срезу глубин. Созданы весьма полезные корреляционные зависимости для данной конкретной ситуации, как показано на рис.3.30.

На фоне вариационного ряда полимодальное распределение указывает на различия температурных условий в среде. Возмущения геотермического поля блока можно поделить на группы: *во-первых*, вариации нормального поля (*переходной зоны*); *во-вторых*, аномалии среды, которые проявляются в относительно холодных и горячих источниках. Аномальный характер отражает соответствие реальным условиям создания ТП. Напряженность теплового поля повышается над положительными структурными формами (*валами, антиклиналями*). Формирование природы поля порождается неодинаковой величиной глубинного потока, различием физических свойств пород и флюидным насыщением среды. Развивается горизонтальная зональность регионального поля, имеющего максимальные и минимальные значения. Комплексной характеристикой региона является изменение вертикальной температурной зональности, которая включает основные закономерности масштаба трансформирования структур. В нашем случае распределение нефтегазонакопления совпадает с переходной зоной, что объясняется состоянием залежи, которая стремится к термодинамическому равновесию с окружающей средой. Одной из причин возникновения двух максимумов на гистограмме распределения нормального поля можно считать миграцию, формирование и продолжительное существование скоплений углеводородов в среде, приводящие к локальному возмущению ТП.

Основные выводы по результатам ТВТ исследований следующие. Местоположение проектной скважины 1, выбранное исходя из вида сейсмической структуры (рис.3.29 б), располагается вне перспективной зоны концентрации УВ, в краевой части геотермического штока, который пространственно совпадает с антиклинальным строением среды. Осевая часть структуры вытянута в юго-западном направлении (рис.3.29 г). Область разбита разломами на ряд неоднородных зон (рис.3.29 в). Оперяющие нарушения имеют сквозной характер, ограничивая формирование свода купола в интервале глубин 1.4–2 км. Ступенчатый характер тектонической формы обусловлен сбросами с азимутом простирания под

углом 300 к меридиану. Образованные в разрезе карнизы на разных глубинах, но на относительно приподнятых отметках, в современном плане созданы надвигами крупных плотных блоков. Природные карманы, аккумулирующие грубозернистые песчаные слои незначительных размеров, теоретически могут являться перспективными участками. Однако для нашего случая система сквозных вертикальных трещин, возможно, создала зону пониженного давления в среде, куда из нижележащих слоев устремлялась нефть с газом и водой. При этом отсутствие хорошо выдержанной покрышки в кровле чехла и четкой выраженности в геотермическом разрезе мощного распространения водного упора, обеспечивающее надежную изоляцию нефтесодержащих горизонтов, не позволило углеводородам накапливаться, создавая крупные залежи УВ.

В целом обнаруживается хорошее совпадение форм сейсмических и ТВТ моделей. В пределах отметки 1 км образуется следующий антиклинальный тип структуры значительной амплитуды, как правило, разбитый локальными дизъюнктивными нарушениями (рис.3.31). В основании прослеживается непрерывный низкотемпературный слой песчанистых и алевролитовых литологических фаций. Исходя из геотермических признаков среда насыщена водным флюидом, а геологические объекты лишены признаков нефтеносности.

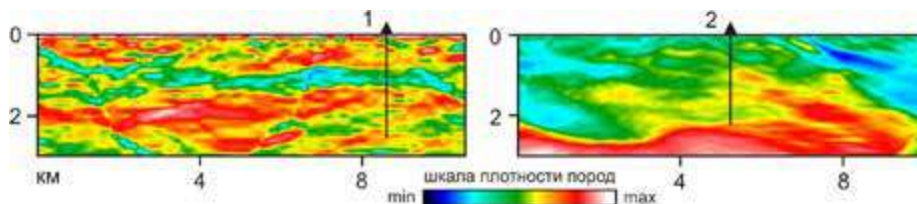


Рис. 3.31. Широтные модели блоково-разломных структур через скважину 1 и перспективную зону 2

Образование условно перспективного горизонта на глубинах 1.76–2.37 км и протяженностью около 1.2 км является зоной разуплотнения геологической среды, которая связана с формированием разрывной тектоники региона. Эффекты смежного сдвига и надвига блоков по системе наклонных разломов привели не только к созданию высокоамплитудных плотных структур, но и зон деструкции в их основании. Установлено три

основных проницаемых горизонта. Интервалы глубин коллекторов располагаются на отметках: первый тепловой прослой 1.76–1.94 км мощностью 160 метров; второй – 2.08–2.16 км (80 м); третий – 2.21–2.26 км (46 м). Основным геологическим риском для образования месторождения УВ является качество покрышки и коллектора. Рекомендуемая глубина бурения не более 2.4 км. Таким образом, по ТВТ устанавливается первый тип геологического строения, формирующий участок среды не перспективный на выявление залежей углеводородов.

Бурение скважины №1 Нефтяной компанией в 2015 году подтвердило сделанное заключение ТВТ на отсутствие залежей углеводородов. Очевиден тот факт, что интерпретация только структурных планов региона, без учета комплекса физических признаков в формировании геологической модели, в дальнейшем не позволит успешно вести разведку углеводородов.

Второй тип структуры (зона 2) установлен в восточной части площади. Перспективная зона в формировании залежи УВ имеет локальное распространение и относительно малые размеры по латерали (рис.3.31). Слои выклиниваются, сливаясь и оставаясь неоднородными по теплопроводности слагающих их пород. Геологическое образование зоны связывается с пологой седловиной основания фундамента. На ранних этапах формирования континентальной части, по-видимому, накапливались крупнозернистые песчаные слои в результате трансгрессии и регрессии моря. В краевых частях зоны сформирована рифовая структура, свидетельствующая о возможности экранирования перетока флюидов.

Третий тип структуры (зона 3) расположен к югу от оси сейсмической структуры на удалении 8 км. Она связана с мощной зоной трещиноватости среды в основании фундамента, которая при ширине около 6 км вытянута на десятки километров. В краевых ее частях располагаются приподнятые плотные блоки фундамента, создающие эффект присутствия в осадочном чехле структур в форме прогиба – грабена (рис.3.32).

В системе дислокаций осадочного чехла сохраняется преобладающее структурное направление развития. Ареал распространения вышележащих горизонтов в большинстве случаев определяется унаследованным формированием осадков в прогибе. В кровельной части чехла возника-

ют многочисленные покрывки в виде отдельных плотных слоев. В разрезе местоположение перспективной зоны контролируется локальными источниками повышенного тепла, что указывает на положительные признаки в формировании залежей УВ в среде. В целом тепловое поле зоны занимает промежуточное положение по отношению к смежным структурам. Эффективная площадь и свойства коллекторов высокоамплитудных структур оцениваются как значительные. Проявление залежей углеводородов следует ожидать на глубинах около 1.8 км. На глубинах свыше 3 км формирование ловушек УВ маловероятно из-за сильного нарушения целостности среды.

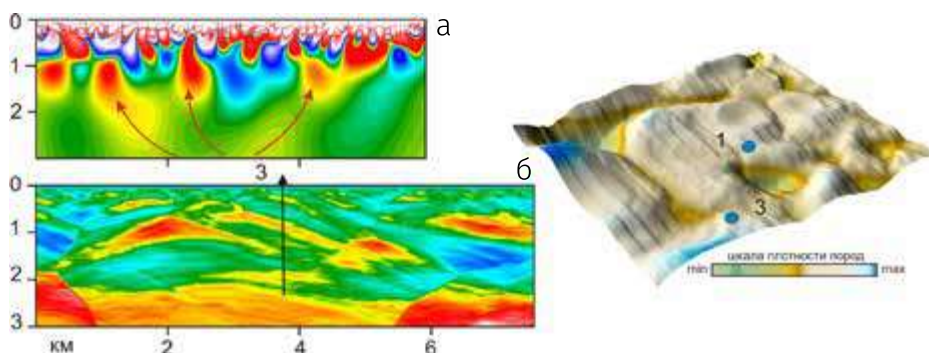
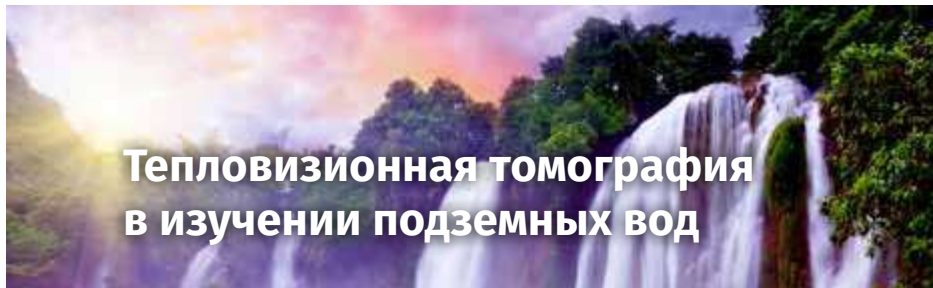


Рис. 3.32. Фрагмент модели тепловых источников (а) и блоково-разломных структур (б) перспективной зоны 3

Региональная оценка перспектив нефтеносности изученного блока со структурно-тектонической позиции положительна. Это обусловлено специфичным развитием складчатого основания. Массивы фундамента образуют в осадочном чехле ряд единых, очень крупных, положительных структур, с чередованием вытянутых линейно-зональных валов и прогибов. Гряды осложнены тектоническими нарушениями, имеющими северо-западное простирание. Развитие мощных биогенных толщ в бортовых зонах прогибов и на сопряженных сводах обусловило создание крупных ловушек залежей нефти. В этом случае общее моноклинальное погружение центральной части площади с наложением погребенных терригенных локальных зон (*мульд*) является основным направлением поиска УВ.

Сформулируем рекомендации по изучению методом ТВТ шельфа моря. Можно успешно прогнозировать закономерности размещения песчаных аккумулятивных форм с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами в структурно-литологических типах. Ранжировать на высоко-, слабо- и неперспективные структуры, с дальнейшей подготовкой их к глубокому бурению. Следовательно, применение ТВТ-технологии на шельфе моря принесет оперативность и стратегические преимущества геофизических работ, фундаментальную основу для оптимизации процесса поиска УВ. Приведенные многочисленные примеры геотермических аномалий над залежами УВ в целом подтверждают изложенное представление об их формировании и показывают большие возможности технологии тепловизионной томографии для разведки углеводородного сырья.



«Он – Тот, Кто смешал два моря (вида воды): одно – приятное, пресное, а другое – соленое, горькое. Он установил между ними преграду и непреодолимое препятствие.» (Сура «Аль-Фуркан», 25:53)

وَهُوَ الَّذِي مَرَجَ الْبَحْرَيْنِ هَذَا عَذْبٌ فَرَاتٌ وَهَذَا مِلْحٌ أُجَاجٌ وَجَعَلَ بَيْنَهُمَا بَرْزَخًا وَحِجْرًا مَّجْجُورًا

4.1. Методический способ обработки космических снимков

Одной из актуальных задач гидрогеологии на протяжении многих десятилетий остается необходимость изучения субмаринных пресных вод и глубинного водообмена между сушей и морем [29]. С глубокой древности известно, что на подводных склонах южного побережья Франции и Испании, берегов Турции, Сирии, Кубы, на Кавказском шельфе Черного моря и в других частях света функционирует большое число субмаринных источников пресных вод, в том числе высокодебитных. Условия образования их местами существенно различаются. Активная субмаринная разгрузка может быть связана с трещинами и карстовыми каналами в горных породах, сравнительно невысоко поднятыми областями питания, большим количеством осадков. Места возможной разгрузки источников в различных частях шельфа достигают нескольких километров, при этом обладая значительным напором, нередко образуя целые пресноводные потоки. Природный феномен вызывает неподдельный научный интерес и имеет большое прикладное значение в жизнедеятельности людей.

Другим, не менее важным, вопросом остается проникновение морской соленой воды в глубину континента по трещиноватым и карстовым полостям, в которых происходит расслоение водной массы: на более низких отметках залегает соленая морская вода, сверху – пресная подземная,

обладающая меньшим удельным весом. Скорость продвижения соленой морской воды в глубину суши обратно пропорциональна напору разгружающихся пресных подземных вод. На равновесие между ними влияют напорный градиент пресного потока и колебания уровня моря, соотношение плотностей пресной и соленой воды и разность их температур, способствующие процессам диффузии [29].

Дефицит пресных вод в ряде районов земного шара и опыт многолетних работ подталкивают исследователей применять на практике более современные нетрадиционные технологии их поиска. Методологический подход космического поиска и оценки запасов подземных вод на уровне региональных гидрогеологических исследований представляется наиболее эффективным, поскольку ограничиваются прогнозируемые площади для дальнейшего изучения перспективных зон пресных подземных вод и конкретизируются индикаторные признаки, типичные для разных генетических типов месторождений воды. Поэтому нами отражены два отдельных аспекта, достаточно тесно связанные между собой: во-первых, методика изучения в региональном плане областей разгрузки подземных пресных вод в прибрежной зоне моря с целью их использования для водоснабжения; во-вторых, процессы морской интрузии (проникновение морской воды в континент и ее попадание в водоносные горизонты). В ходе анализа дистанционных данных способом тепловизионной томографии геологической среды изучена динамика вод в естественных условиях для юго-восточной части территории Королевства Испании. В частности, установлены подземные стоки флюидов (пресной и морской воды) по слоям и глубинным зонам разломов, местоположения резервуаров в верхней части коры в пределах моря [38].

Комплексный анализ спектрозональных космических данных по суше и морю выполнялся по снимкам в инфракрасном и видимом диапазонах, схемам рельефа местности и батиметрии моря (рис.4.1). В качестве топографической основы использованы векторные и растровые электронные карты высокого разрешения. Применен подход, включающий два этапа обработки космических спектрозональных снимков. Во-первых, нахождение плотности потока теплового излучения среды для суши и акватории Испании с построением разноглубинных блоково-разломных структур. Во-вторых, расчет вегетационного индекса и извлечение

комплексной информации о пространственной и временной динамике спектральных параметров состояния растительности и почвы (ISN, IWN) в увязке с глубинным строением геологической среды. Способ защищен патентом Российской Федерации на изобретение [75].

К настоящему времени технология тепловизионной томографии и эффективность ее применения в природно-техногенных системах подробно описаны в ряде публикаций [35,36]. Остановимся на методике определения зон разгрузки подземных пресных вод через морское дно, которая основана на выявлении участков с пониженной биологической продуктивностью в результате постоянного распреснения морских вод. Наличие в плане аномальных участков является признаком угнетения водных экосистем, которое может быть связано с выходом холодных подземных вод, препятствующих нормальному, естественному развитию фито- и зоопланктона. На практике широко используют в качестве индикатора NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный разностный индекс растительности (впервые описанный В.Ж.Розе), имеющий высокую и устойчивую корреляцию с концентрацией хлорофилла [132]. Индекс вычисляется со спутников Landsat-TM/ETM+ по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} ,$$

где NIR – коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра; RED – коэффициент отражения в красной области спектра.

Следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей исследуемого свойства, и их значения зависят от ширины спектральных каналов, разрешения сенсора, условий съемки, освещенности, состояния атмосферы. Определение участков шельфа с пониженными значениями показателя NDVI, по данным космической съемки, позволяет локализовать области с аномально низкой биологической продуктивностью и уточнить местоположение зон выхода пресных вод. Результативные карты составляют в масштабе съемки путем подбора цветовой раскраски амплитуды вариации параметра.

Особенность гидрогеологического строения может устанавливаться по состоянию природно-ландшафтных систем, индикаторами которых

4. Тепловизионная томография в изучении подземных вод

являются *ISN* – нормализованный индекс «стресса» растительности и *IWN* – нормализованный «инфракрасный» индекс состояния растительности и почв.

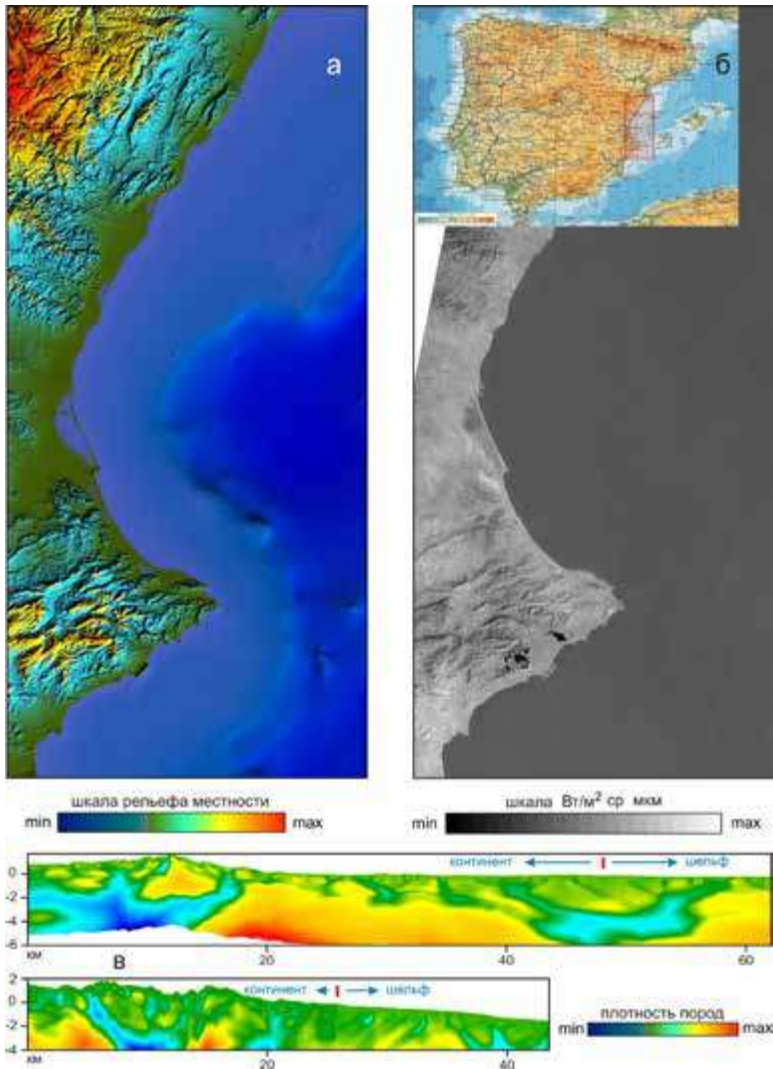


Рис. 4.1. Схема рельефа местности и батиметрии моря (а), инфракрасный снимок (б), характерные разрезы блоково-разломных структур (в) для территории Испании

Индекс IS является универсальным, интегральным индикатором водно-теплового стресса растительных ландшафтов. Повышенные величины IS свидетельствуют о большей вероятности присутствия на исследуемой территории стрессового состояния растительности. Этот индекс более эффективен, чем применение по отдельности его составляющих TR и TVI, так как максимально полно отражает основные признаки угнетенного состояния фитоценозов – понижение значений вегетационного индекса и повышение температуры.

Концентрация хлорофилла зависит от биологической продуктивности водных экосистем и обладает значительной сезонной изменчивостью. Для прибрежных (*шельфовых*) и морских участков северо-западной части бассейна Средиземного моря максимальный пик приходится на март–апрель (рис.4.2). Минимальные средние значения концентрации хлорофилла наблюдаются в июле–августе [119]. Исходя из этого для расчета индекса и последующего анализа был отобран ряд снимков Landsat-ETM+, полученных в марте и ноябре за разные годы съемки.

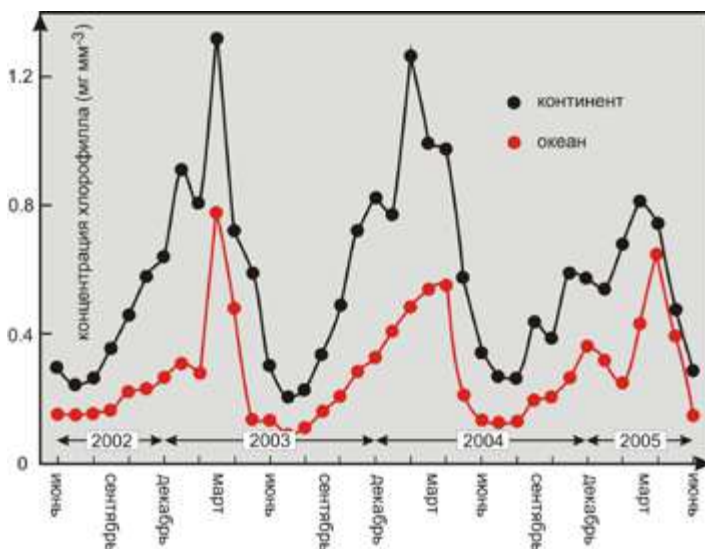


Рис. 4.2. Изменение среднемесячной концентрации хлорофилла за 2002–2005 годы в прибрежных и морских участках северо-западной зоны Средиземного моря

4.2. Проявление зон субмаринной разгрузки подземных вод

Определение путей миграции воды с больших глубин и мест кумуляции ее в верхней части осадочного разреза на площади 34 тыс. км² потребовало от нас провести анализ более 40 космических снимков Landsat-TM/ETM+ с различным пространственным разрешением и временным интервалом, которые обеспечили многоуровневое тепловизионное зондирование геотермической ситуации в геологической среде. Выполнено объемное картирование геодинамических активных разломов, зон разуплотнения пород с улучшенными коллекторскими свойствами, в состав которых входят области повышенной проницаемости и флюидообмена, способные быть природными резервуарами воды. Это позволило выявить благоприятные в отношении поисков зоны разгрузки подземных вод через морское дно.

Под природным резервуаром следует понимать часть породы, которая содержит залежи пресной или слабоминерализованной воды и образована на больших глубинах. Как известно, любой отдельно взятый резервуар неповторим в деталях. Однако можно подметить и общие черты сходства, позволяющие создать классификацию основных элементов, характеризующих его структурные особенности в размещении залежи воды. К этим элементам следует отнести: состав и структуру породы-коллектора, эффективное поровое пространство, состав и содержание флюида, резервуарную ловушку.

Главнейшую роль в распределении поверхностных и подземных стоков играет разное геологическое строение территории Испании с активными горными областями питания. Если верхние слои сложены относительно водонепроницаемыми породами, то основная часть осадков стекает по поверхности земли в море по рекам Михарес, Турия, Хукар и др. Альтитуда источника питания местами превышает 1300 м. Напротив, в районах, сложенных рыхлыми породами, легко впитывающими влагу, и с развитой дизъюнктивной тектоникой в основном формируется подземный сток. При этом пласты в разрезе, как правило, имеют резкую смену проницаемости по простирацию. Наблюдается зональная неоднород-

ность независимо от того, создана ли структура коллектора карбонатным или терригенным комплексом пород. По форме они представляют собой линейные, ограниченные по ширине зоны, в которых происходит миграция воды на значительное расстояние от источника. Выход пресных вод может быть ограничен подземными природными резервуарами с разным объемом флюида. Неизменными остаются два условия формирования гидрогеологической системы: во-первых, воды в породе коллектора имеют подпитку с расположенных на значительной глубине горизонтов; во-вторых, присутствие в верхней части разреза локальных вертикальных зон трещиноватости пород нарушает естественную герметичность покрывки структуры. Образованная система циркуляции воды в геологической среде позволяет эффективно ее выявлять и изучать на основе тепловизионной томографии путем локализации холодных зон в разрезе (рис.4.3).

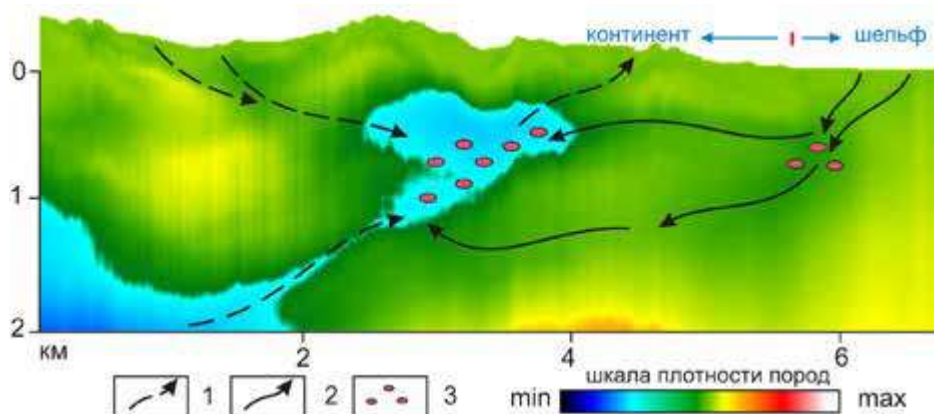


Рис. 4.3. Модель блоково-разломных структур по континенту и шельфу моря. Условные обозначения: 1 – стоки пресных подземных вод; 2 – проникновение морской интрузии; 3 – зона накопления морской воды в карстовой полости

Под эффективным поровым пространством подразумевается та часть породы-коллектора, которая доступна для миграции и аккумуляции воды и обеспечивает ее сохранность. Степень свободы перемещения флюида зависит от проницаемости пористой среды. Эти фильтрационно-ем-

костные свойства пород определяют способность коллектора удерживать и отдавать воду. Изучив петрофизические параметры коллекторов, приходим к выводу о том, что коэффициент открытой пористости для рассматриваемого региона изменяется в широких пределах от 1 до 8 %. Установив объемное строение ловушки по данным тепловизионной томографии, можно сделать прогноз естественных ресурсов субмаринных вод. По нашим расчетам, наибольший объем резервуара эндогенной залежи воды составил 2000 тыс.м³.

Состав и содержание флюида весьма различно в эффективном поровом пространстве. В данном случае целесообразно рассматривать основной вид вод – свободные жидкие совершенно не связанные с частицами пород, представляющие собой сложные растворы. Они подразделяются на свободную гравитационную (флюид находится в крупных, сверхкапиллярных порах пород и передвигается под действием силы тяжести), свободную капиллярную и сорбционно-замкнутую воды. Минерализация природных вод изменяется в очень широких пределах.

Эндогенная вода может находиться в состоянии статического или динамического равновесия. Непрерывное движение подземных вод обусловливается физико-геологическим состоянием среды, возникающим в результате деформационных процессов, происходящих в земной коре (сжатия и растяжения блоков). Эти изменения заставляют флюид перемещаться вдоль градиентов из зон высокой потенциальной энергии к зонам более низкой энергии. В рассматриваемом случае это могут быть как латеральные, так и вертикальные миграции свободной гравитационной воды. Подобные явления имеют большое значение при региональном перемещении флюидов по ослабленным зонам.

Если плоскость контакта пластов почти горизонтальна, то возникают условия, при которых вода, либо неподвижна в пласте, либо слабо изменчива за счет градиента давления флюидов, что приводит к движению жидкости параллельно напластованию. В таких условиях можно наблюдать обособленные локальные холодные зоны теплового поля, которые ограничиваются по глубине плотными блоками пород (рис.4.4 а). В большинстве случаев это равновесие нарушается в результате природного притока какого-либо дополнительного количества глубинного флюида

по вертикальным трещиноватым зонам, отчетливо проявляющимся на моделях блоково-разломных структур (рис.4.4 б, в). Местами их скопления являются трещины в хрупких породах фундамента.

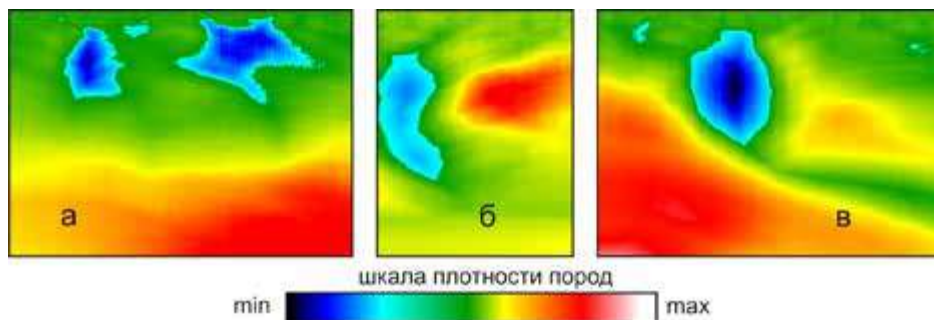


Рис. 4.4. Модели замкнутых (а), вертикально восходящих (б) и наклонно восходящих (в) природных каналов флюидов

Резервуарная ловушка обуславливает удержание залежи воды. Она представляет собой форму залегания породы-коллектора с непроницаемой крышкой, благодаря чему в среде создаются условия формирования залежи. Ловушки образуются в результате разнообразных структурных и стратиграфических особенностей пород-коллекторов. Анализ результатов тепловизионной съемки показывает, что природный резервуар может представлять собой *линейную*, со слабонаклонной или вертикальной плоскостью, *объемную* или *сложно-построенную* камеру (рис.4.5). Под сложно-построенной ловушкой следует понимать сочетание разнообразных объемных и линейных камер, соединенных между собой локальными проницаемыми зонами.

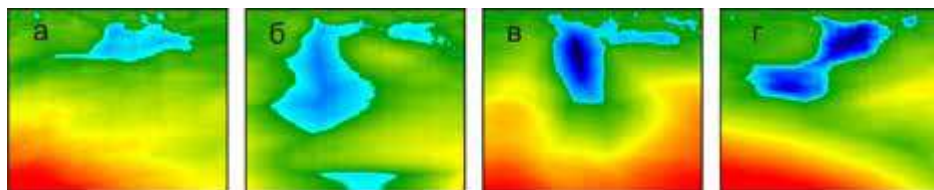


Рис. 4.5. Классификация природных резервуаров в моделях блоково-разломных структур на горизонтально-линейные (а), вертикально-линейные (б), объемные (в) и сложно-построенные (г) камеры

Удержание флюида в ловушке, предотвращение утечек в латеральном и вертикальном направлениях возможно при условиях комбинации структурной формы с проницаемыми или слабопроницаемыми породами. При несоблюдении этих условий, а также инверсии давления в пластах, может возникнуть миграция подземных вод к дневной поверхности или образование морской интрузии. В этом случае, на моделях блоково-разломных структур будем наблюдать нарушение однородности структуры верхней части разреза ТП в виде отдельных вертикальных холодных зон. Они являются природными каналами, приводящими к изменению состава флюида и смешиванию пресной и морской воды. В модели теплового поля выделяются резервуары, которые различаются свойствами покрышек на непроницаемые и слабопроницаемые, которые разрушены трещиноватыми каналами (рис.4.6).

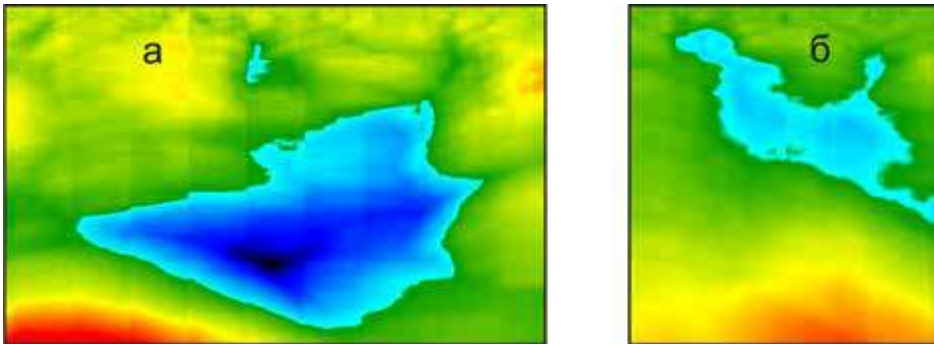


Рис. 4.6. Вид покрышек, подразделяющийся в моделях на непроницаемые (а) и разуплотненные (б)

Более сложным процессом явилось установление зон дренирования экзогенных и эндогенных пресных вод через морское дно. Модель с инфильтрационным режимом не в полной мере отвечает геологическим условиям. В большинстве своем это связано с присутствием в геологических разрезах аномально плотных блоков, создающих преграды подземным водам в пределах береговой зоны, которые препятствуют прямой миграции континентальных грунтовых вод в море. Возникает ситуация, при которой подземные стоки вод не способны преодолеть путь по латерали из-за природного барьера в среде в виде блока пород высокой плотности (рис.4.7).

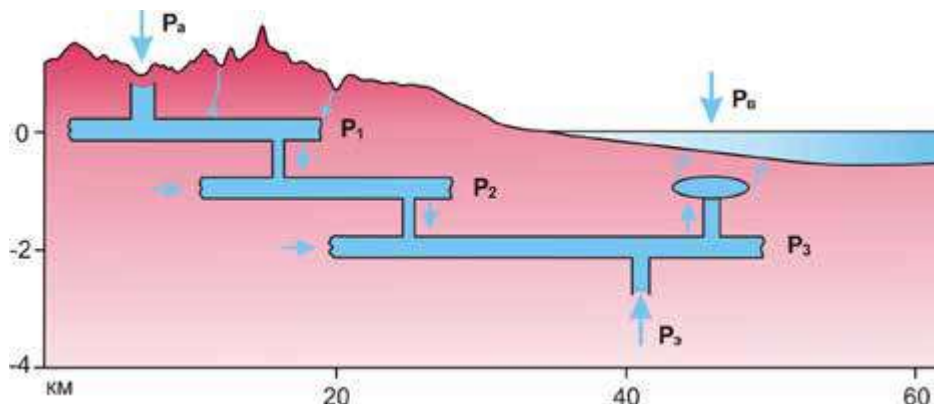


Рис. 4.7. Эвристическая региональная модель среды

Модель среды подразделяется на области питания (ПК 0–20 км) водоносного горизонта (P_a) и расположенной ниже области разгрузки (ПК 45 км), которые связаны условной потенциметрической поверхностью. На площади, где эта поверхность проходит ниже рельефа земли, образуется так называемая «зона пониженного давления» (P_1 , P_2 , P_3). На происходящий процесс накладывается элизионный гидродинамический режим ($P_э$), усиливающий фонтанирование природного резервуара в море. Присутствие непроницаемых вертикальных барьеров в пласте приводит к формированию направленного вверх и/или вниз суммарного потока и накоплению рассола вблизи их границ.

В связи с этим, по-видимому, континентальные воды также обладают элизионным режимом. Напор создается за счет отжатия воды из уплотняющихся пород, вследствие разности давлений и под действием силы тяжести [17]. Вначале флюид проникает по зонам разломов в смежные водоносные горизонты, расположенные на различных уровнях и объединяющиеся в крупные гидрогеологические этажи. Водоносные комплексы с общими условиями создания напора и движения вод, как правило, образуют водонапорные системы. Толщина зоны насыщения (выделяется синим цветом) колеблется в широких пределах и может достигать нескольких сотен метров.

Таким образом, следует принять, что сводная модель среды сформирована системой, включающей последовательность вертикально-нис-

ходящих потоков, переходящих в прямолинейно-параллельный поток. Комбинация вертикальных и горизонтальных водотоков повторяется многократно, охватывая все более глубокие слои разреза. В благоприятных гидрогеологических условиях формирование модели завершается вертикально восходящим потоком с образованием природного резервуара пресной воды. Восходящее направление эндогенных вод происходит в местах возникновения градиента давления глубинного флюида из-за интенсивного геодинамического напряжения пластов земной коры. Возможно, механизм создания этих условий связан с ранее происходившей вулканической деятельностью региона.

По особенностям вегетационного показателя и изменениям локального теплового поля среды в плане выделяется аномальная зона (на рисунке показана темно-синим цветом), с которой связаны выходы пресных подземных вод. Температура подземных и морских вод обычно неодинакова. В разрезе распространение субмаринных вод (ПК 3,8 км) в шельфовой части моря ограничивается крупными и мелкими блоками плотных пород (рис.4.8).

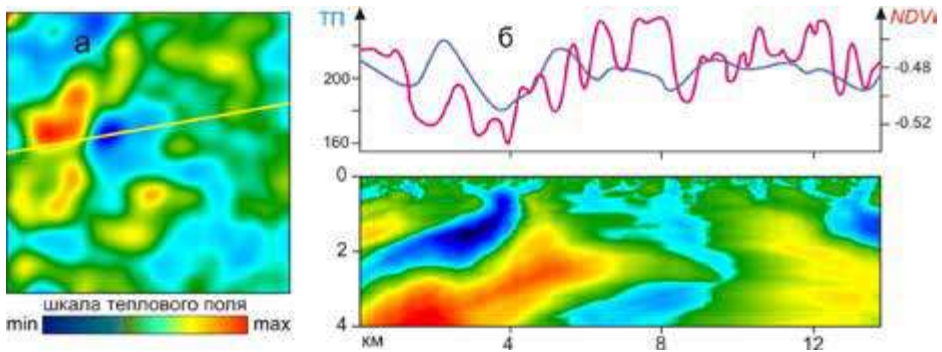


Рис. 4.8. Проявление субмаринных вод на карте локального теплового поля (а), разрезе блоково-разломных структур и графиках спектральных характеристик (б)

Наличие в разрезе резервуарной ловушки без выхода пресной воды в море или проникновение морской воды в верхнюю часть разреза не отражается на графике NDVI (рис.4.9).

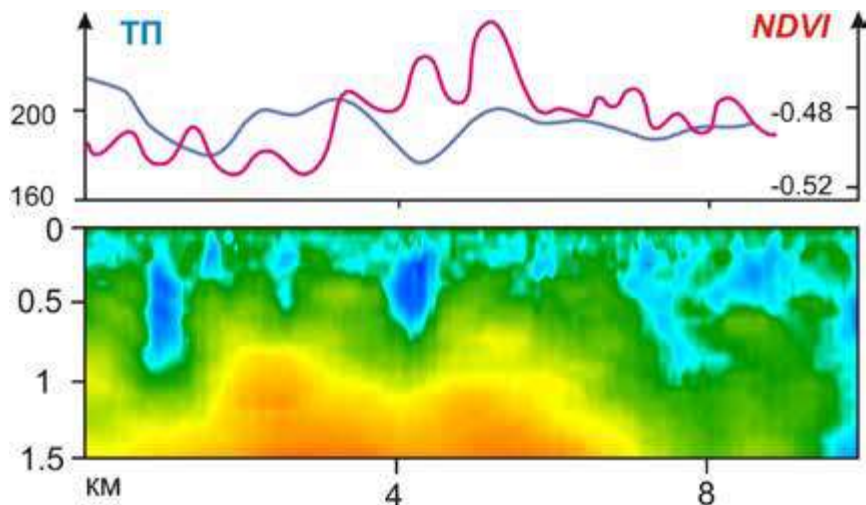


Рис. 4.9. Формирование резервуаров по шельфу моря

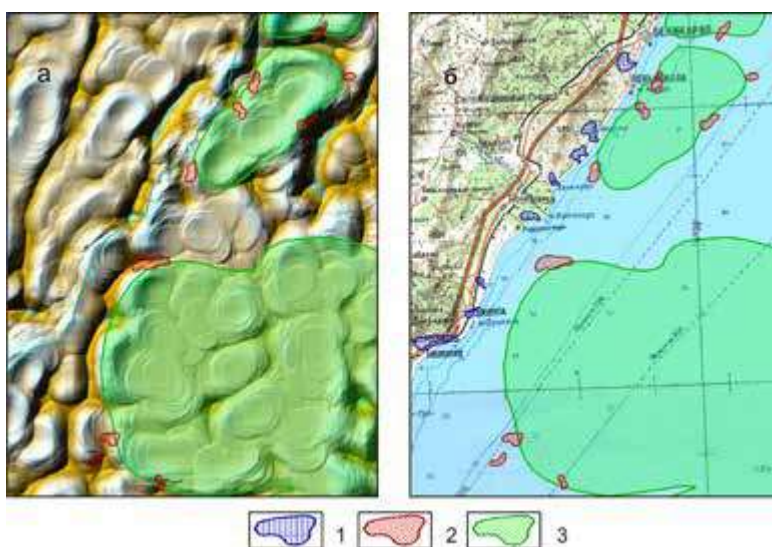


Рис. 4.10. Фрагмент карты районирования природных подземных резервуаров воды. Условные обозначения: 1 – зона интрузии морской воды; 2 – зона субмаринной разгрузки подземных вод; 3 – региональная зона высокой плотности пород

Результаты районирования территории Испании по зонам формирования природных резервуаров пресной воды совмещены с фрагментом карты-среза блоково-разломной структуры для глубины 2 км (рис.4.10 а) и топографической основой (рис.4.10 б). Они включают в себя локальные аномальные зоны с элементами путей миграции пресной воды и областями, ограничивающими их распространение. Всего на территории выделено 14 перспективных участков.

Под морем, на больших глубинах, выявлены крупные блоки относительно повышенной плотности, форма которых, возможно, связана с изменением положения фундамента и развитием погребенных вулканических структур. Местами они неоднородны по тепловым свойствам, но контролируют скопление пресных вод в среде, не давая возможности распространяться (образовываться) внутри самого блока.

Подчеркнем другую особенность ТП, которая вытекает из детального рассмотрения местоположения продуктивных зон, совмещенных с блоково-разломной картой. Они выстраиваются в слабо уловимую цепочку и соединяются линейной зоной разуплотнения, которая может изменяться в плане. Это природный гидродинамический канал, связывающий камеры на глубине и контролирующей гидрогеологическую обстановку района. В пределах его распространения возможно появление активной разгрузки континентальных пресных вод. На отдельных участках ситуация развитого сгона отмечалась на расстоянии в 23 км от берега.

4.3. Выявление зон морской интрузии в береговой зоне

Ранее достаточно подробно были рассмотрены некоторые феноменальные явления природы, связанные с источниками артезианских вод, которые могут быть на дне моря (субмаринные зоны), если разность уровней между областью их питания (на суше) и областью разгрузки (под морским дном) достаточно велика. Напор пресной воды в таких сообщающихся сосудах преодолевает давление столба морской воды в месте выхода источника, и пресный фонтан начинает бить из морского дна. В соленой морской воде образуется пресный оазис.

Следует упомянуть о другом явлении природы – существовании процессов интрузии морских вод (sea water intrusion). Вторжение соленых морских вод заключается в проникновении их в горизонты подземных пресных вод суши в прибрежных районах и устьях рек при снижении зеркала пресных вод или гидравлического напора. Различают поверхностные, латеральные, прямые и опосредованные пути проникновения в водоносные горизонты [46].

Поверхностное загрязнение подземных вод характеризуется поступлением флюидов с поверхности земли при непосредственной инфильтрации сточных вод из накопителей, с территорий предприятий, орошаемых земель, а также с атмосферными осадками.

Латеральное загрязнение вод происходит путем поступления в водоносный горизонт при интрузии морских вод в континентальную часть, при фильтрации из поверхностных водостоков в условиях их тесной взаимосвязи с подземными водами и при снижении их уровней в результате отбора вод.

Опосредованное загрязнение вод происходит путем вертикального перетока из смежного по разрезу водоносного горизонта. Загрязнение может происходить через гидрогеологические окна, которые разделяют водоупор, или по стволу скважин. Зона неустойчивого струйного течения случается повсеместно из-за близкого расположения шельфа моря. Специфика фильтрационно-диффузионной модели миграции в пласте состоит в том, что в какой-то момент времени это оказывает влияние на режим интенсивной добычи пресных вод.

Поэтому одной из важнейших задач становится проблема контроля над качеством пресных вод, требующая в свою очередь знания режима движения поверхностных и грунтовых вод вблизи скважин, характеристик появляющихся зон интрузии (*ширины, формы, пространственного расположения*). Определение аномальных зон в плане и разрезе на участках вероятного проявления морской интрузии можно проводить на основе космической съемки.

Рассмотрим проявление процессов морской интрузии на территории Испании вдоль береговой линии (рис.4.11). Общими природными условиями, при которых морская вода проникает в континент

и попадает в водоносные горизонты, являются следующие факторы: превышение удельного веса морской воды над весом пресной воды; наличие трещиноватости (пористости) пород ниже уровня моря, создающей естественные каналы, по которым флюид мигрирует в глубь водоносного горизонта в разных направлениях; отсутствие или слабый градиент давления воды прибрежных водоносных горизонтов (на границе суша – море); техногенное воздействие на пласт-коллектор, которое связано с интенсивным извлечением пресной воды на суше, приводящее к значительному перепаду давления флюида, при этом интрузия может вызвать засоление или загрязнение скважин. Указанные признаки находят отражение в различных характеристиках теплового поля. В частности, по выраженности формы рисунка блоково-разломных структур устанавливается присутствие или отсутствие зон морской интрузии на суше.

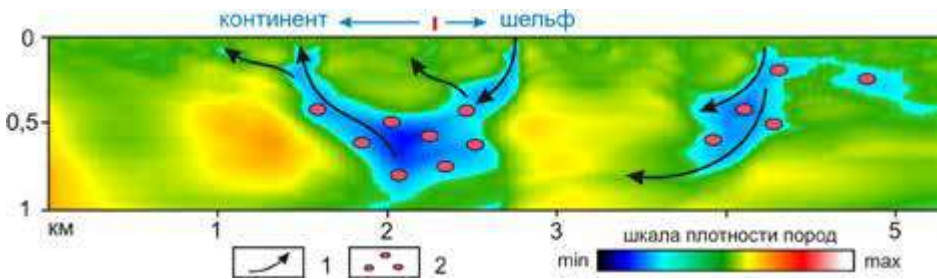


Рис. 4.11. Модель формирования зон морской интрузии на границе суша–море. Условные обозначения:
1 – проникновение морской интрузии; 2 – зона накопления морской воды в карстовых полостях

По верхней части разреза выявляется наличие одного или нескольких узких линейных каналов, которые пронизывают осадочный чехол от пород ниже морского дна до континентальной суши, а также примыкающие к ним локальные зоны относительно низкой плотности пород. По разрезам через предполагаемую в плане зону устанавливаются ярко выраженные каналы и камеры (участки низкой плотности пород) и природные барьеры (плотные блоки), ограничивающие распространение интрузии морской воды. Из общей картины изменчивости и дифферен-

циации (градиента) теплового поля среды от орогенных структур до моря для разных глубин определяется связь развития и интенсивности многих физико-динамических процессов (к примеру, вертикальной и горизонтальной циркуляции вод, рассеянных по многочисленным трещинам).

В береговых водоносных горизонтах гидравлический градиент обычно направлен к морю. Поэтому между текущей к морю более легкой пресной водой и лежащей ниже более тяжелой морской водой формируется зона контакта. Независимо от рельефа во всех случаях морская вода часто в форме клина находится ниже пресной. Но может наблюдаться проникновение с полным или частичным перемешиванием по глубине. Морская и пресная воды – это фактически смешивающиеся жидкости, и поэтому поверхность раздела между ними ввиду явления гидродинамической дисперсии в большинстве случаев размыта. Зона контакта имеет форму переходной зоны, в которой концентрация пресной воды постепенно меняется.

Схематизация переноса флюида. Коэффициент стока в более глубокие горизонты обычно пренебрежимо мал. Он играет заметную роль только в зонах развития проницаемых тектонических нарушений, которые хорошо дешифрируются по ТВТ. В слоистой пористой структуре среды линейная миграция флюидов зависит от насыщенности рассолов и воды. Перенос имеет неустойчивый характер движения, возникающий при внедрении тяжелой (*плотной*) жидкости в легкую фракцию [46]. Условно можно предположить две стадии внедрения: *быструю*, при которой отсутствует растворение флюида на контакте двух жидкостей, и *медленную* – образование переходной зоны слабой концентрации раствора. Существенную роль начинает играть конвективно-молекулярный массоперенос, с формированием подвижной границы в латеральном направлении. Возникающий эффект в латеральных разрезах должен проявляться в виде зональности (*пятна в пласте*) дифференциальных тепловых параметров. Учитывая, что физический процесс нелинейный и величина ТП настолько мала (*на уровне погрешности измерений*), задача может быть корректно решена численными методами с использованием априорной информации и с применением специальных математических процедур. Основанием является различие тепловых свойств насыщающих породу флюидов (*при одинаковой пористости пластов*).

Вероятно, что совместное движение рассола и слабой концентрации водного раствора может происходить по собственным каналам. Обмен между морским рассолом и пресной водой в пористой среде будет происходить при определенных условиях. Во-первых, если рассол расположен над водой, гравитационное перераспределение фаз сопровождается на начальной *быстрой* стадии осаждения. Уменьшение количества рассола происходит за счет объемной диффузии до момента гравитационного расслоения фаз и формирования устойчивой границы их раздела. После этого начинается *медленная* стадия смешивания рассола. Растекание ядра вдоль подошвы пласта может сопровождаться вихревым процессом, обусловленным различием распределения давления в сечении слоя. Во-вторых, если вода размещена над рассолом и в объемной камере, то граница деления жидкостей является устойчивой. Процесс выравнивания концентрации морской воды в пласте происходит весьма медленно только за счет контактного и объемного массообмена, так как отсутствует зона неустойчивого движения.

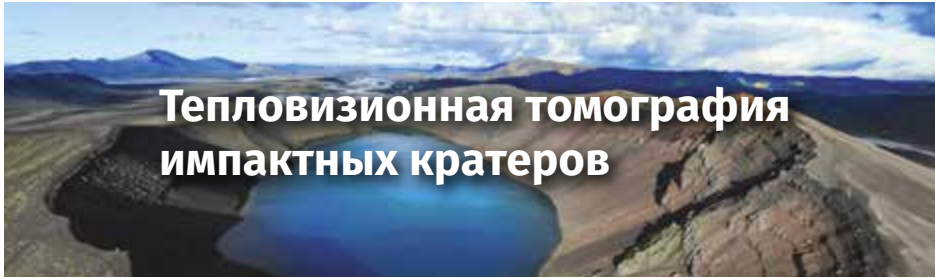
Собранный фактический априорный материал подтверждает результаты ТВТ. К их числу относят распределение в почве повышенной концентрации хлорности воды (ее производная – соленость). Литологический состав пород, слагающих прибрежную часть континента (песчаники, трещиноватые известняки). Результаты эксплуатации гидрологических скважин в пределах выделенных зон. Орогидрография изучаемой местности – общий характер и главные формы рельефа, тип водоразделов (гребневидные, пологие, столообразные), относительное превышение водоразделов над днищами долин.

В результате проведенных на территории Королевства Испании работ доказана эффективность применения метода ТВТ при изучении различных условий формирования субмаринных вод и зон морской интрузии с целью рационального, экологического и безопасного использования ресурсного потенциала в хозяйстве.

Главным преимуществом технологии тепловизионного зондирования среды является легкость получения данных по большому региону и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. В частности, по рисунку поля блоково-разломных структур можно выполнить объемное

картирование геодинамических активных разломов, зон разуплотнения пород с улучшенными свойствами коллекторов, в состав которых входят области повышенной проницаемости и обмена флюидов, способные быть природными резервуарами воды. С этой целью разработана классификация основных элементов, характеризующих структурные особенности в размещении залежи пресных вод в природных резервуарах. Это позволило выявить благоприятные в отношении поисков зоны разгрузки подземных вод через морское дно, территориально районировать зоны морской интрузии.

Численное моделирование миграции флюидов в сложных средах показало, что физическая модель водонапорной системы континентальных подземных вод Испании обусловлена двумя эндогенными процессами. Во-первых, фильтрационным режимом в коллекторах сложной структуры – миграция вод осуществляется через высокопроницаемые зоны за счет разности высот под действием силы тяжести. Во-вторых, элизионным режимом – напор создается за счет отжатия воды из уплотняющейся среды. Процесс конвергенции пород происходит не повсеместно, а только в отдельных местах.



Защитный слой земли: «Мы сделали небо оберегаемой кровлей...» (Сура «Аль-Анбийя», 21:32).

وَجَعَلْنَا السَّمَاءَ سَقْفًا مَحْفُوظًا
وَهُمْ عَنْ آيَاتِنَا مُعْرِضُونَ

Функция гор: «Он поместил на земле незыблемые горы, дабы она не колебалась вместе с вами...» (Сура «Ан-Нахль», 16:15).

وَأَلْقَى فِي الْأَرْضِ رَواسٍ أَنْ تَمِيدَ
بِعِزِّهَا وَأُتْرَاقًا وَيَسْبَأُ لَهَا وَتَكُونُ

5.1. Строение кратеров по данным тепловизионного зондирования

Комплексное изучение крупных кратеров (воронок, лунок), расположенных на поверхности Земли диаметром в десятки километров, показало, что причиной таких катастроф прошлого является падение гигантских метеоритов, или импактные события (от англ. «impact» – столкновение, взаимодействие). Метеоритная бомбардировка Земли стала рассматриваться только с 60-х годов прошлого века благодаря работам геологов Р. Дитца, Р. Грива, Е. Шумейкера [129]. В 1960 году американский геолог Р. Дитц предложил называть их астроблемами, что в переводе с греческого означает «звездная рана». Точность и образность термина обеспечили ему повсеместное признание. На Земле обнаружено около 160 крупных астроблем диаметром в десятки и сотни километров, которые имеют разный возраст образования. Распределение астроблем по поверхности Земли носит случайный характер (рис.5.1). Больше всего их в восточной части Северной Америки, в Европе и Австралии [81]. Геология метеоритных кратеров в России возникла с изучения структуры Porigai на севере Восточной Сибири [59].

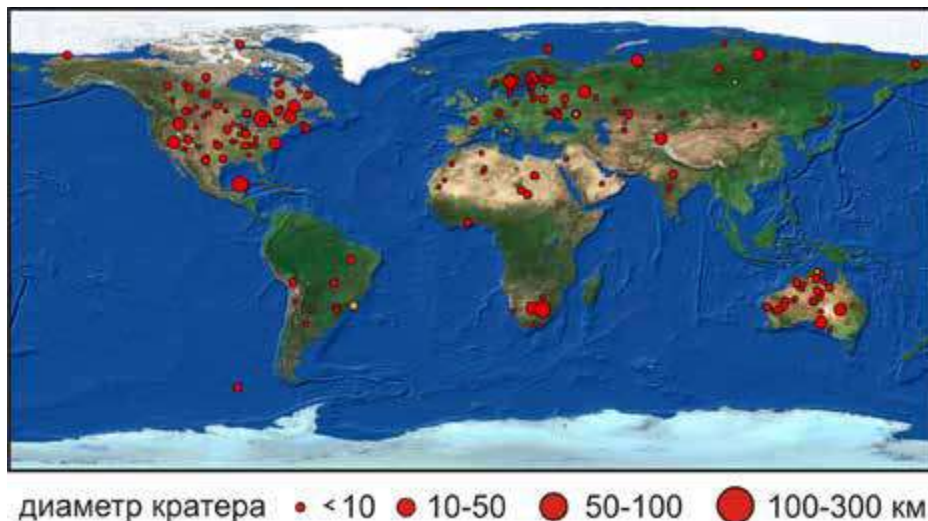


Рис. 5.1. Схема расположения импактных кратеров на поверхности Земли

Изучению строения астроблем посвящены многочисленные работы [125,115,128]. К настоящему времени установлено, что форма и размеры импактных кратеров, характер преобразования в них пород земной коры являются результатом ударного метаморфизма космических тел (метеоритов) – процесса своеобразного, совершенно не похожего на другие геологические явления, происходившие на Земле. Ударный метаморфизм горных пород приводит к образованию месторождений многих полезных ископаемых, в том числе и залежей углеводородов. Промышленные запасы нефти и газа разведаны в 14 астроблемах Канады, Мексики и США.

В книге рассмотрены два аспекта в изучении импактных кратеров на основе спектрональной космической съемки со спутников Landsat-TM/ETM+ и Terra/Aqua-MODIS [40,37]. Во-первых, геофизические особенности строения среды в зависимости от размеров, условий формирования и местоположения импактного события. Во-вторых, оценка в пределах недр кратера возможности формирования и сохранности залежей воды и углеводородов.

Процесс исследований заключался в обработке спектрозональных космических снимков разного пространственного разрешения по известным в мире кратерам (см. таблицу 1), в ряде которых ранее выявлены залежи углеводородов. Детально рассмотрен импактный кратер Siljan Ring в центре Швеции, представляющий большой практический интерес при разведке УВ. Достоверность полученных результатов достигнута применением единого методологического подхода тепловизионной томографии к импактным событиям, исследованием объектов в зависимости от размеров и географического положения астроблем, детальностью изучения земной коры на всю ее мощность, сопоставлением геотермических моделей с известными геолого-геофизическими данными, развитием современной концепции формирования кратера путем установления деталей объемного строения геологической среды.

Характеристика импактных кратеров [81]

Таблица 1

Наименование	Широта	Долгота	Диаметр (км)	Возраст (млн. лет)	УВ
Siljan Ring (Швеция)	61° 02' с.ш.	14° 52' в.д.	52	377	+
Sierra Madera (США)	30° 36' с.ш.	102° 55' з.д.	13	100	+
Chicxulub (Мексика)	21° 20' с.ш.	89° 30' з.д.	145–180	65	+
Popigai (Россия)	71° 39' с.ш.	111° 11' в.д.	100	39	+
Serra da Cangalha (Бразилия)	8° 05' ю.ш.	46° 52' з.д.	12	300	–
Vredefort (ЮАР)	27° 00' ю.ш.	27° 30' в.д.	140	2023	–
Teague Ring (Австралия)	25° 52' ю.ш.	120° 53' в.д.	31	1685	–
Strangways (Австралия)	15° 12' ю.ш.	133° 35' в.д.	25	1000	–
Spider (Австралия)	16° 44' ю.ш.	126° 50' в.д.	13	570	–
Gosses Bluff (Австралия)	23° 49' ю.ш.	132° 19' в.д.	22	142	–
Connolly Basin (Австралия)	23° 33' ю.ш.	124° 45' в.д.	9	60	–

Особенности современного строения астроблем зависят от многих причин, среди которых главными являются энергия соударения и угол встречи ударника (метеорита) с мишенью (земной поверхностью), а также геолого-тектонические процессы, накладывающиеся в последующий период формирования региона (рис.5.2).

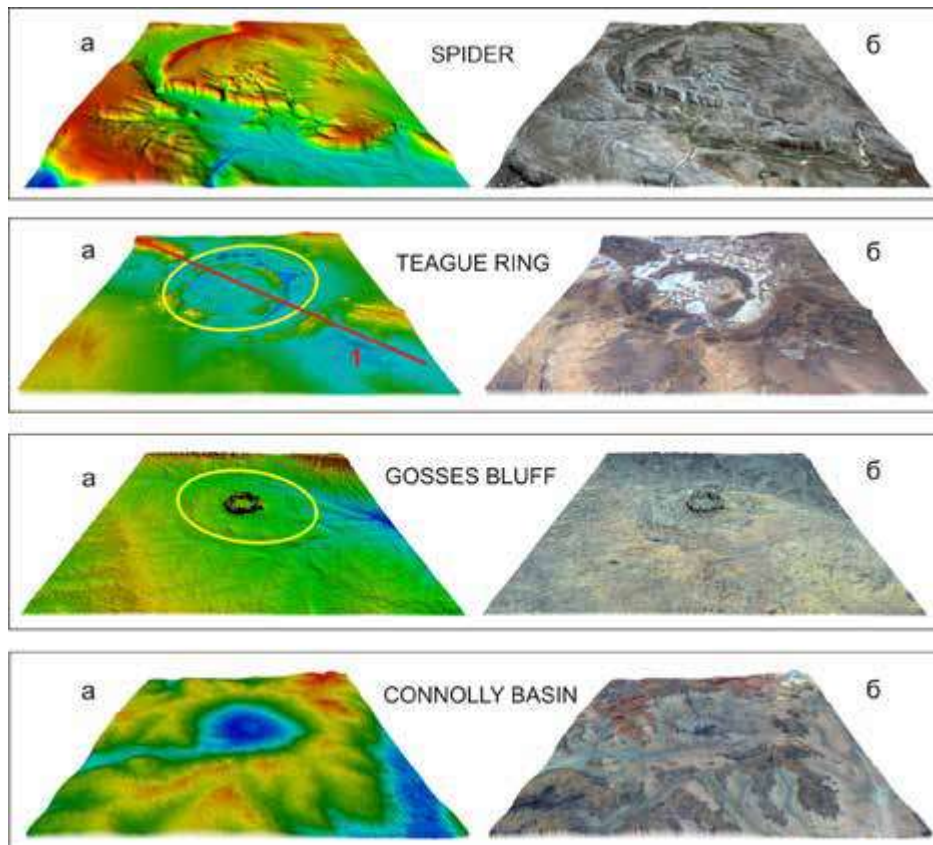


Рис. 5.2. Модели импактных кратеров в виде карт рельефа местности (а) и цветового композита (RGB) видимого диапазона (б) Landsat-ETM+

Энергия соударения определяет общие размеры метеоритного кратера и сложность его внутреннего строения. От угла встречи зависит форма астроблемы в плане. Большая часть кратеров имеет в плане округлую форму. Это свидетельствует о крутом движении ударника близко к вертикальному положению. Пологое падение приводит к появлению кратера, вытянутого по направлению движения ударника. Чем меньше угол встречи при соударении, тем сильнее вытянута структура. При данных условиях центральная часть поднятия может иметь форму выпуклого или вогнутого типа.

Для малых кратеров образуются поднятия центрального или кольцевого видов, отображающиеся на видимом снимке повышением значений рельефа местности (рис.5.3). Это связано с гравитационной неустойчивостью среды на стадии экскавации (*упругой отдаче пород мишени в области максимального их сжатия под точкой удара*), в результате чего происходит выпучивание вверх днища кратера. На карте-срезе структур, построенной на глубине 2 км (рис.5.3 б), центр кратера обрисовывается положением локального, концентрического по виду разуплотнения среды. На срезах глубиной более 5 км тепловое поле не отражает форму кратера. В его основании появляются многочисленные линейные тектонические нарушения, указывающие на особенности строения среды.

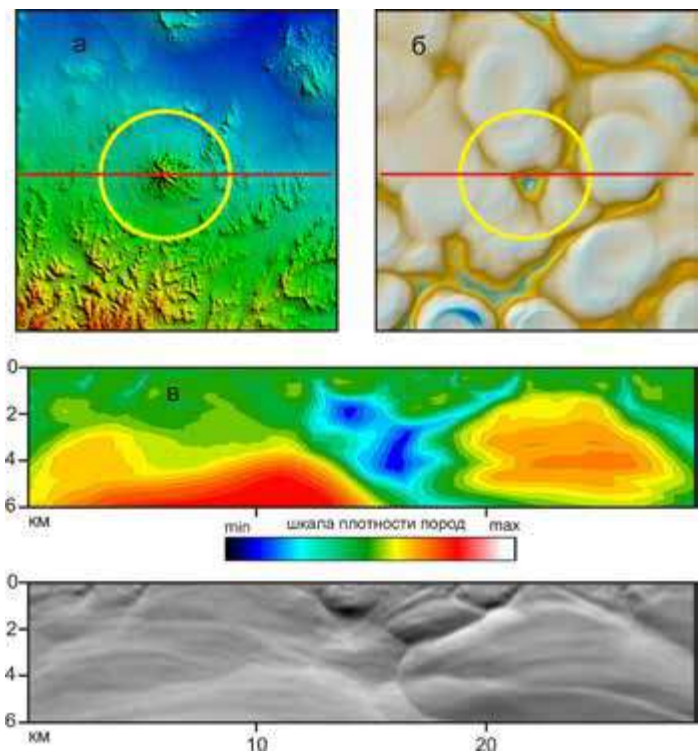


Рис. 5.3. Схема рельефа местности (а), карта-срез на глубине 2 км (б) и модели блоково-разломных структур кратера Sierra Madera в цветном и монохромном изображении (в)

Во всех рассмотренных примерах кратеры имеют обрамление по периферии в виде отдельных участков повышения рельефа, что непосредственно связано с эффектами, происходящими при деформации среды. На практике это дает основание визуально оценивать площадь распространения воронки на местности. Однако в реальных условиях область внутренней деструкции геологической среды может не совпадать с рисунком поля деформации пород, которую мы наблюдаем на дневной поверхности. Во многом это ограничивает получение достоверной информации о глубинной структуре кратеров и без применения инструментальной геофизической съемки, в частности тепловизионной томографии, не представляется возможным установить истинную изменчивость среды. Особенно это актуально при изучении гигантских кратеров (например, *Chicxulub*), современный геологический облик которых существенно зависит от двух событий (часто не связанных между собой) – экзогенного (астроблема) и эндогенного (тектоническая активность региона).

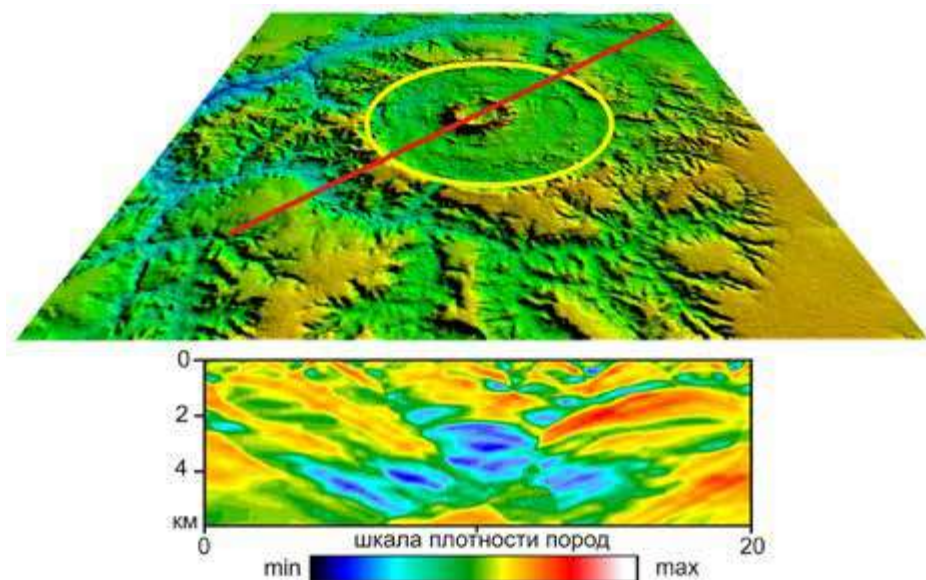


Рис. 5.4. Модели рельефа местности и блоково-разломных структур в дифференциальном виде кратера Serra da Cangalha

Структура эндогенного теплового поля связана с формой кратера и силой воздействия метеорита на геологическую среду. В целом геометрия кратера обрисовывается структурой листрических разломов, представленных на разрезах зонами пониженного теплового поля, распространение которых зависит от размеров воронки. Максимальная глубина проникновения дизъюнктивной (разрывной) деформации оценивается из следующего отношения $H=D/(3\div 5)$. Признаком слабого влияния на геологическую среду импактного события является развитие в основании линейных зон тектонических нарушений, которые расчленяют на глубине плотные блоки коры и не отражают в рисунке поля форму кратера.

Природа образования этих структурных особенностей совпадает с гравитационными эффектами закономерного чередования в разрезе положительных и отрицательных возмущающих масс (рис. 5.5–5.6).

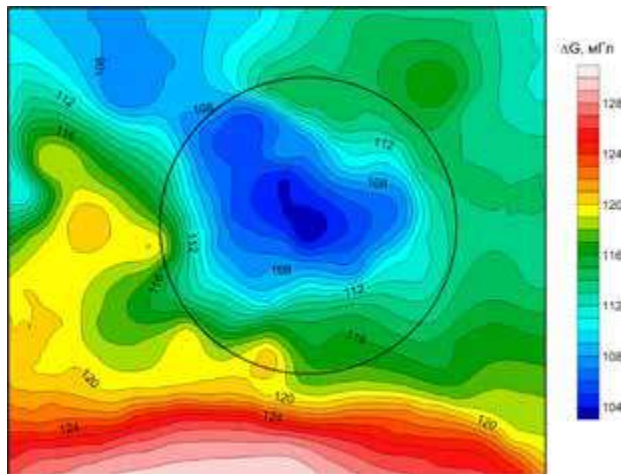


Рис. 5.5. Карта гравитационного поля в редукции Буге кратера Teague Ring

Многочисленные контрастные аномалии в редукции Буге показывают наличие в плане изометричных источников с минимальной плотностью среды над центром кратеров. Зоны пониженных значений ΔG_B изменяются в пределах 0.01–30 мГл для 60 структур диаметром 0.4–200 км (рис.5.7).

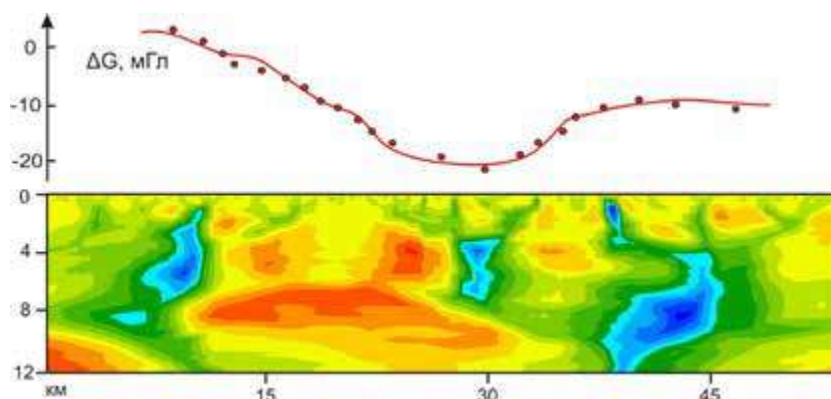


Рис. 5.6. График гравитационного поля в редукции Буге над моделью блоково-разломных структур кратера Teague Ring

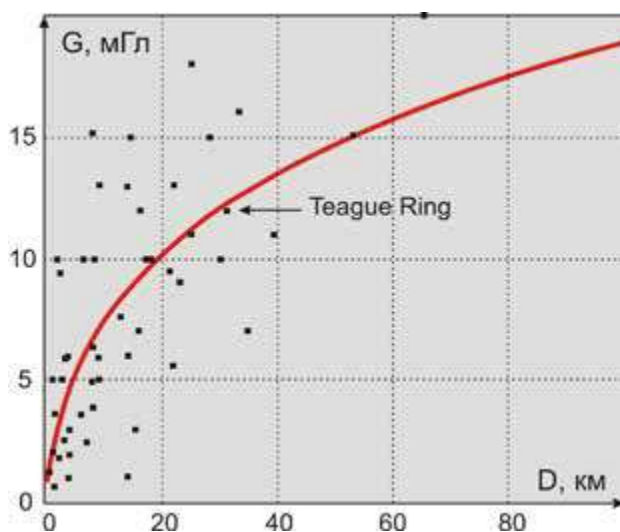


Рис. 5.7. График зависимости $G=f(D)$

Модель плотностной неоднородности земной коры описывается степенной зависимостью $\Delta G_b = 5.23 \cdot D^{0.312} - 3.24$, которая получена нами по данным Plescia J.V. [133]. График иллюстрирует образование самых низких значений гравитационного поля над центром кратеров малых размеров (до 20 км).

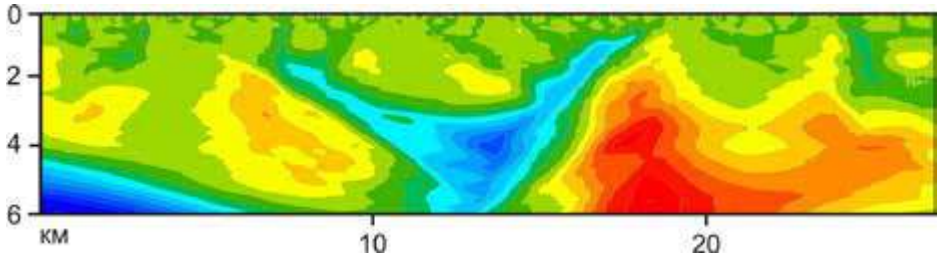


Рис. 5.8. Модель блоково-разломных структур импактного кратера Spider

В результате моделирования теплового поля впервые установлено повсеместное формирование в слоистой среде на разных глубинах низкотемпературного слоя (рис.5.8), напоминающего коническое или полусферическое по форме тело, природа образования которого нами связывается с областью локального разуплотнения среды, насыщенной глубинным флюидом (см. таблицу 2). Эти воды не затронуты артезианскими течениями и поэтому на больших площадях имеют однообразный состав и одинаковое содержание компонентов. В зоне застойного режима концентрация хлоридов в 2–8 раз больше, чем в морской воде, а отношение кальция к натрию значительно выше [83].

Глубинное строение зоны разуплотнения кратеров

Таблица 2

Наименование	Глубина Н км	Ширина R км	Диаметр кратера на поверхности D км
Siljan Ring (Швеция)	6 – 8	20 – 25	25 – 40
Sierra Madera (США)	2	2,3 – 4	9,6 – 13
Chicxulub (Мексика)	15 – 20	20 – 60	150
Popigai (Россия)	12 – 14	30 – 45	60 – 73
Serra da Cangalha (Бразилия)	3	3 – 4	12
Vredefort (ЮАР)	12 – 17	20 – 35	60 – 116
Teague Ring (Австралия)	5 – 10	12 – 18	24 – 30
Strangways (Австралия)	2 – 4	4,5	15 – 18
Spider (Австралия)	3,5	4,5	12
Gosses Bluff (Австралия)	8 – 10	12	24
Connolly Basin (Австралия)	3	4	12

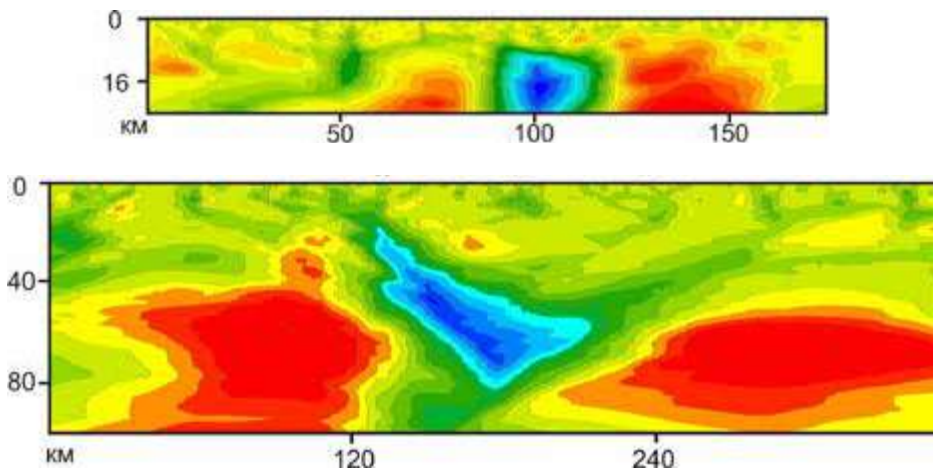


Рис. 5.9. Модель литосферы импактного кратера Vredefort

В некоторых случаях встречается образование целого ряда низкотемпературных камер, закономерно располагающихся по глубине и увеличивающихся в своих размерах до верхней мантии. Камеры могут формировать региональную зону трещиноватости в среде, объединяясь между собой узкими вертикальными или наклонными каналами, представляющими зоны флюидоперетоков в породах разного вещественного состава. В отдельных кратерах гигантских размеров наблюдаются камеры, имеющие замкнутый характер строения (рис.5.9). По периферии и глубине они включены в плотные блоки земной коры (фрагмент рисунка ПК-100 км), которые препятствуют глубинной связи с мантийными растворами. В свою очередь, установленная особенность может служить некоторым объяснением природы формирования углеводородов в среде и их отсутствия вокруг и внутри кратера Vredefort.

Устанавливается зависимость отношения глубины и ширины (H/R) зоны разуплотнения в основании кратера от диаметра (D) структуры, определяемого по результатам интерпретации видимых и инфракрасных снимков (рис.5.10). Наилучшая связь параметров описывается функцией экспоненциального вида $(H/R) = 0.788 \cdot e^{-0.0336D} + 0.217 \cdot e^{-0.0013D}$.

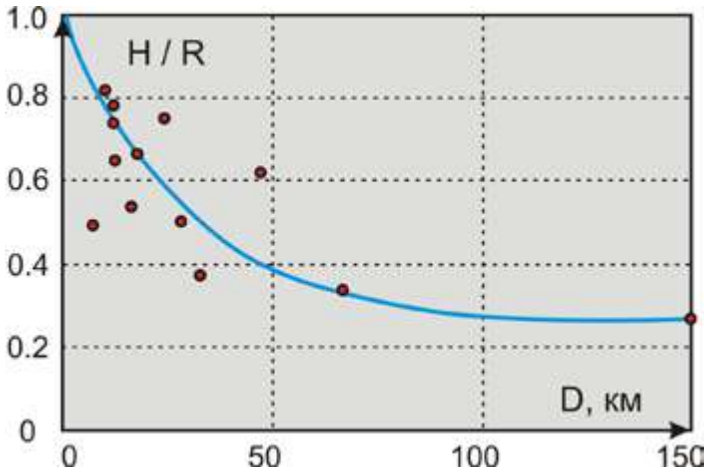


Рис. 5.10. График геометрической зависимости для кратеров

По априорным сведениям о поперечном размере импактной структуры, проявившейся в рельефе земной поверхности, можно теоретически оценить глубину залегания камеры, породы которой, как правило, насыщены водными флюидами. Их появление объясняется влиянием гидротермальных процессов, возникающих за счет превращения кинетической энергии падающих на Землю метеоритов в тепловую энергию. Результат протекающего процесса от раннего высокотемпературного щелочно-метасоматоза к более позднему низкотемпературному метасоматозу, приводит к замещению первичных пород ассоциациями водосодержащих минералов. В этом случае могут образовываться и экономически значимые запасы полезных ископаемых, включая зоны растворенных углеводородов.

Особенности строения кратеров могут устанавливаться по состоянию природно-ландшафтных систем, индикаторами которых являются нормализованный индекс «стресса» растительности ISN [39] и «инфракрасный» индекс состояния растительности и почв IWN [40]. Предлагаемый подход в интерпретации основан на извлечении комплексной информации о пространственной и временной динамике спектральных параметров состояния растительности и почвы (ISN, IWN) в увязке с глубинным строением геологической среды. При этом глубинные тектонические на-

рушения Земли рассматривают как систему природных подводящих каналов для миграции к поверхности флюидогазовых эманаций, которые образуют участки перетоков в проницаемых средах и накопления в пористых средах в форме многоэтажных камер. Возникающие зоны разуплотнения пород с улучшенными коллекторскими свойствами, в состав которых входят пористые зоны флюидов, способны быть природными резервуарами воды и растворенных УВ. Состояние почвенно-растительного покрова, определяемое путем спектрозональной съемки, дает геохимическую информацию, которая отражает аномальное воздействие углеводородов и подземных вод на верхнюю часть разреза.

Местоположение залежей подземных вод определяют по пространственному сочетанию следующих признаков – минимальные значения изолиний плотности потока теплового излучения в разрезе блоково-разломных структур на уровне продуктивного горизонта и наименьшие параметры нормализованных индексов состояния растительности и почв (ISN, IWN) в местах выхода флюида на земную поверхность. Наибольшие значения теплового потока в разрезе блоково-разломных структур, совпадающие с максимумами графиков индексов ISN и IWN, которые построены для дневной поверхности, интерпретируют как зоны, не содержащие залежи подземных вод.

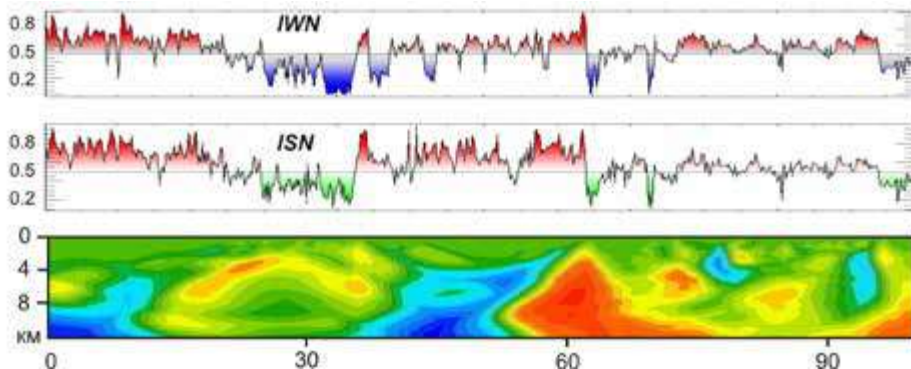


Рис. 5.11. Модель блоково-разломных структур кратера Teague Ring

Так как концентрация хлорофилла зависит от биологической продуктивности растений и обладает значительной сезонной изменчивостью, то на примере Западной Австралии можно наглядно увидеть простран-

ственное изменение природной среды в окрестностях кратера Teague Ring (рис.5.11). Для обработки использован снимок за август, относящийся к периоду минимальных значений температур, осадков и влажности.

Центральная часть аномалии графика ISN, выделенная относительно среднего уровня 0.5, совпадает с местоположением кратера (ПК 35–62 км). Максимальные значения ISN попадают в зону развития плотных пород осадочного чехла, которые были преобразованы в условиях метаморфизма на стадии экскавации и существенно препятствуют выходу водных растворов к поверхности. И только в краевых частях воронки, по-видимому, происходит беспрепятственная восходящая миграция эндогенного флюида. Совершается подпитка водой зарослей скрэба (*вечнозеленых ксерофитных кустарников*) и спинифекса. В результате индекс «стресса» растительности достигает минимальных значений.

Аномалии IWN, чувствительные к содержанию влаги в растительности и почве, как правило, повторяют форму графика ISN. И только в местах повышенной концентрации воды в почве дневной поверхности образуются глубокие минимумы, которые попадают на соленые сезонные озера (ПК 38 и 43 км). Пространственное совпадение IWN с локальными зонами разломов указывает на возможную природу формирования влаги в почве и разбивает флюидную систему на экзогенную и эндогенную составляющие. В этой связи морфологический анализ карты индекса IWN бесспорно повышает информативность интерпретации космической съемки.

Исходя из вышесказанного делается вывод о том, что особенности строения структурного плана импактных кратеров в основном определяются характером разломной тектоники, образующей в верхней части разреза чашеобразную форму астроблемы. Следует полагать, что астроблеме свойственна модель каркасного типа, составными элементами которой являются разломы, вертикально падающие в верхней части разреза и приобретающие к основанию листрическую форму. Сопряженные с разломами горизонтально залегающие слои трещиноватости постепенно затухают с глубиной, формируя камеры накопления флюидов. Разные по форме и размерам плотные блоки создают общий облик разреза.

Все эти структурные элементы, прослеженные от коры до чехла включительно, создают в пространстве каркас с характерными очертаниями блоков ЗК. Они развивались как взаимосвязанная единая система тектонических элементов. Система глубинных разломов играла роль подводящих каналов для поступления к поверхности флюидогазовых эманаций, образуя участки перетоков и накопления флюидов в виде многоэтажных камер. По существу происходит собирание рассеянных, растворенных углеводородов в скопления при определенных термодинамических условиях.

Остановимся на одном из возможных механизмов восходящего движения флюидов в коре. Если предположить, что углеводородные образования поднимаются с больших глубин, то процесс миграции любого флюида к поверхности Земли возможен только за счет разности давлений. Следует выделить две стадии переноса основной массы по трещинам. Во-первых, летучие компоненты при нагревании освобождаются из твердых веществ и создают давление в порах. Если в этом процессе участвуют только мелкие поры, не сообщающиеся друг с другом, никакого движения не возникает. Вторая стадия процесса может быть реализована только в породах, имеющих значительную концентрацию флюида. В этом случае возникающие поры образуют домены – области с взаимосвязанной трещинной пористостью. Если такой флюидонасыщенный домен растет, достигая значительных вертикальных размеров, то под влиянием силы выталкивания легкие флюиды в более плотных породах будут подниматься вверх. Градиент литостатического давления определяется плотностью пород и обычно превышает градиент давления флюида. Границы распространения флюидонасыщенного домена по вертикали обусловлены предельной прочностью среды. В местах, где происходит практически непрерывный поток флюидов снизу, может образовываться система доменов ограниченной вертикальной высоты, создающих в совокупности крупные зоны разной конфигурации. Непроницаемые слои (барьеры) возникают вследствие сжатия пород тогда, когда поровое давление несущественно. В этом случае на моделях проявляются разнообразные по строению камеры. Эта связь действительно прослеживается на многочисленных примерах (рис.5.12–5.13).

Следовательно, при определенных термобарических условиях водный флюид-носитель способен осуществить перенос нефтяных компонентов

в довольно высоких концентрациях, обеспечивающих накопление значительных количеств нефти и газа в ловушке, где будет происходить разделение УВ и воды. Другой важной особенностью является то, что гидротермальные растворы служат не только носителем УВ, но и сами формируют емкости для их депонирования в горных породах.



Рис. 5.12. Модель импактного кратера Popigai в виде карт рельефа местности (а) и цветового композита (RGB) видимого диапазона (б) Landsat-ETM+

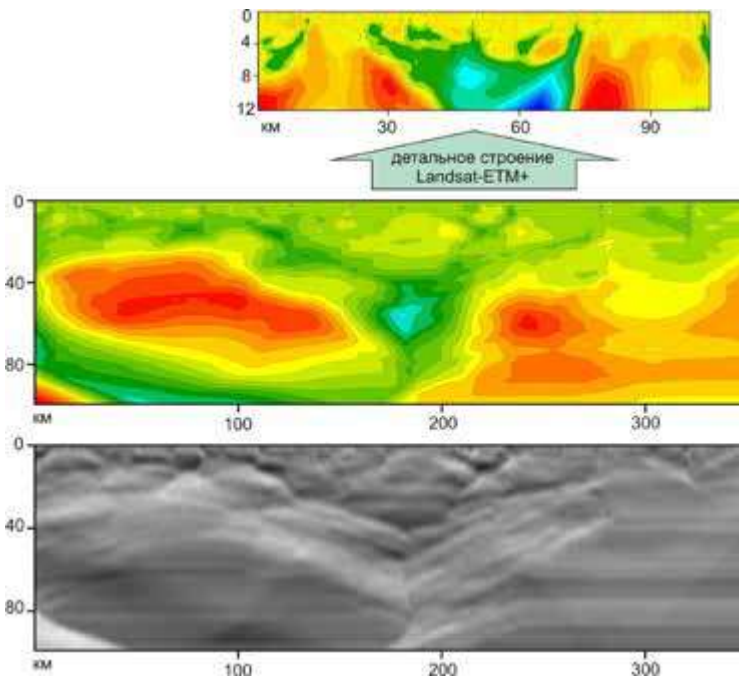


Рис. 5.13. Модель литосферы импактного кратера Popigai в цветном и монохромном изображении по данным спутника Terra-MODIS

5.2. Объемный метод подсчета запасов воды и углеводородов

Указанные методические выводы послужили теоретической основой подсчета геологических запасов исходя из объемного содержания флюидов в вышеописанных кратерах. Несомненно, что строение природного резервуара определяется типом, вещественным составом слагающих пород, видом пустотного пространства пород-коллекторов и выдержанностью этих пород по площади. Петрофизические свойства флюидов зависят от температуры и литостатического давления слоев земной коры. Поэтому исходя из типа природного резервуара, который целесообразно рассматривать в нашем случае как массивный, принято два варианта при оценке запасов – интегральная и дифференциальная модели.

Интегральная модель подкратерного резервуара представляет собой единую камеру с усредненными физическими и геометрическими характеристиками среды. Например, принимается нормальное распределение литостатического давления и температуры в земной коре для кровли и подошвы резервуара. Тип пустотного пространства смешанный, состоящий из поровой, трещинной и кавернозной форм. Допускается, что открытая пористость пород в пределах камеры может изменяться от 1 до 5%, объем свободной воды в среде достигать 80% от объема пор. В этом случае теоретический расчет объемного содержания флюидов в вышеописанных кратерах всегда будет иметь завышенные значения по сравнению с реальными природными условиями залегания. В качестве формулы расчета объема растворенных углеводородных газов [23] воспользуемся следующей зависимостью $V_{z-b} = S \cdot h_{эф} \cdot K_{no} \cdot K_z \cdot K_g \cdot \alpha$, где K_{no} – среднее значение коэффициента открытой пористости; K_z – среднее значение коэффициента газонасыщенности; K_g – среднее значение коэффициента водонасыщенности; S – горизонтальная проекция площади на заданном участке глубин; $h_{эф}$ – эффективная мощность насыщения коллектора; $\alpha = f(K_p, K_t)$ – пересчетный коэффициент сжимаемости газа, который связан с барическим K_p и термическим K_t коэффициентами;

$$V_{\text{кол}} = \iint_{S(x,y)} (h_{\text{эф}}) \cdot (x, y) dx dy$$

– определяет объем пустотного пространства коллектора.

Дифференциальная модель обладает детальным строением природного резервуара и выглядит в виде системы слоев, расположенных на разных глубинах, охватывающих породы осадочного чехла и кристаллического фундамента. В создаваемых многоэтажных камерах флюидогазовых эманаций изменчивость физических свойств продуктивного пласта обуславливается, в первую очередь, коллекторскими свойствами (*пустотностью в целом и ее видов – пористостью, трещиноватостью, кавернозностью, проницаемостью*), состоянием среды и флюида с учетом РТ условий. В этом случае подсчет объемным методом начальных запасов свободного газа имеет вид:

$$\Sigma Q_{\Gamma} = K_{\Gamma} \alpha \sum_{i=1}^n \iint_S (h_{\text{эф}}^i \cdot K_{\text{но}}^i) \cdot (x, y) dx dy$$

В таблице 3 приведены прогнозные балансовые запасы свободного газа и воды на основе априорных петрофизических данных.

Природные ресурсы кратеров для модели среды

Таблица 3

Наименование	Камера, V км ³	Флюид, V _ф км ³	УВ, ΣQ км ³
Siljan Ring (Швеция)	125	3,82 – 5,60	0,62
Sierra Madera (США)	0,94 2,40	0,05 – 0,15	0,017
Serra da Cangalha (Бразилия)	3,10 1,77	0,08 – 0,24	–
Teague Ring (Австралия)	1,88 0,59	0,03 – 0,12	–
Spider (Австралия)	1,26	0,02 – 0,06	–

Некорректность решения поставленной задачи связана в первую очередь с тем, что в реальности природная флюидная модель является динамической системой со своим фазовым пространством. Если рассматривается несжимаемая жидкость ($\rho = \text{const}$ – *плотность*) в недеформируемой пористой среде ($m = \text{const}$ – *пористость*, $k = \text{const}$ – *прони-*

цаемость), можно рассчитать скорость фильтрации (ω) – особый вид движения жидкости. Параметры ρ , μ (вязкость флюида), t и k – функции координаты и времени. В дальнейшем можно оценивать параметры однофазной фильтрации жидкости для земной коры кратеров согласно экспериментальному закону А. Дарси, в соответствии с которым скорость фильтрации прямо пропорциональна градиенту давления, и работе Н. Е. Жуковского [7], показавшего, что существует математическая аналогия теплопроводности и фильтрации.

5.3. Геофизическая характеристика импактного кратера Chicxulub

В начале 1990-х годов был обнаружен в Мексике на полуострове Юкатан древний кратер Chicxulub диаметром 145–180 км. Предполагается, что на рубеже мезозоя и кайнозоя астероид размером 10 км столкнулся с Землей под углом 45° , вовлекая в переработку (до глубины 15 км) горизонты земной коры континентальной части и шельфа Мексиканского залива. Ударное происхождение захороненной кольцевой структуры кратера гигантских размеров обосновывается признаками импактного события [144,109,136], которые проявились в аномалиях гравитационного и аэромагнитного поля (рис. 5.14) и в электрических моделях МТЗ (рис. 5.15).

Структура кратера Chicxulub представлена современными осадочными отложениями, которые не позволяют увидеть на спектрозональных снимках отчетливое плановое изображение формы кратера. Снимки с разным пространственным разрешением показывают новые и подтверждают существовавшие особенности глубинного строения объекта, отвечающего импактному событию. В региональном плане кратер проявляется во всех потенциальных геофизических полях в виде кольцевых зон разного ранга и интенсивности, которые охватывают континентальную и шельфовую части среды.

Из материалов тепловизионного зондирования следует, что глубина преобразования горизонтов земной коры в результате импактного воздействия достигает 20–25 км. Образование в разрезе субгоризонтальных слоев совпадает с формой структуры кратера, а угол наклона и границы слоев имеют отчетливую связь с блоками коры.

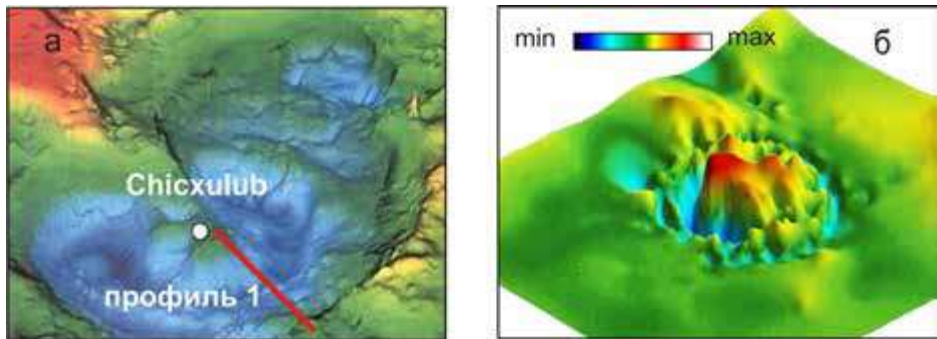


Рис. 5.14. Карты гравитационного поля в редукции Буге (а) и магнитного поля ΔT (б) кратера Chicxulub, с расположением профиля МТЗ и ТВТ

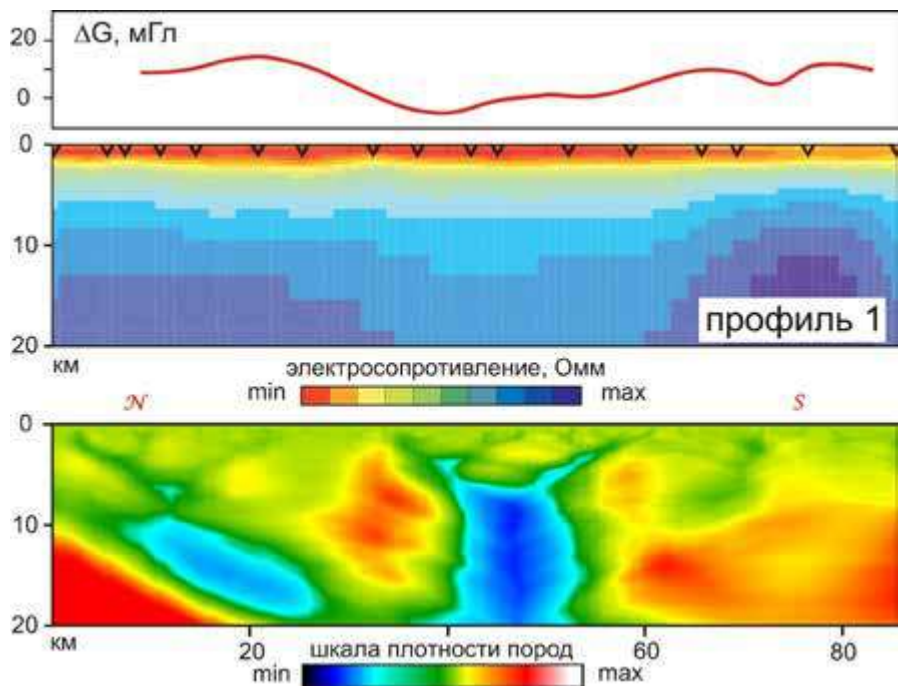


Рис. 5.15. Сопоставление графика гравитационного поля, моделей МТЗ и блоково-разломных структур по ТП снимкам Landsat-TM над импактным кратером Chicxulub

В моделях блоково-разломных структур ТП в полной мере проявились особенности потенциальных полей. Над эпицентром кратера удельное электрическое сопротивление слоев уменьшается до 5–10 Ом·м на фоне регионального поля 1000 Ом·м. Сохраняется корреляционная связь ТП с градиентом гравитационного поля, который местами достигает 35–40 мГл.

Система сложно-построенных низкотемпературных камер образует зоны, представляющие в общих чертах современную разломную тектонику кратера Chichulub. Камеры условно можно разделить по форме на наклонные (угол оси около 30° – 45°) и вертикальные зоны. Первый тип приурочен к краевым частям кратера, второй – встречается ближе к центру структуры. На разном удалении от эпицентра объекта возникают столбообразные разуплотненные камеры, которые соединены в пространстве ЗК слабо уловимыми горизонтально расположенными зонами перетоков флюидов. В нашем случае геотермическая обстановка во многом определяется размерами и структурой формирования флюидных систем.

В коре шельфа Мексиканского залива можно наблюдать низкотемпературный слой (20–40 км), который, безусловно, связан с пониженной плотностью пород, насыщенных глубинным флюидом. Его изменение контролируют отражающие сейсмические площадки. Полоса повышенного их количества совпадает с областями разуплотнения в модели. Они выстраиваются в ломаную линию, очертание которой указывает, что на глубинах 33–37 км расположена граница раздела кора-мантия.

Гигантские размеры кратера, природные условия его возникновения, последующие изменения геолого-тектонической обстановки в Мексиканском заливе привели к тому, что мы не обнаруживаем в тепловых моделях бесспорных признаков, характеризующих структуру в целом и которые наблюдаются для кратеров малых размеров.

5.4. Особенности строения импактного кратера Siljan Ring

Древний кратер Siljan Ring, находящийся в шведской провинции Даларна, образовался около 370 млн лет назад в результате удара метеорита диаметром до 5 км. Скорость метеорита была порядка 11 км/с. Пло-

щадь кратерного озера составила 290 км². Возникший кратер наполнился со временем молодыми осадочными породами.

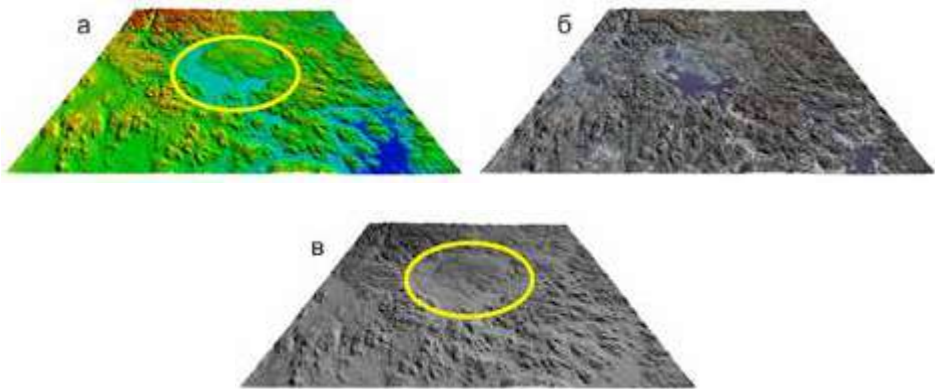


Рис. 5.16. Модель импактного кратера Siljan Ring в виде карт рельефа местности (а), цветового композита (RGB) видимого диапазона (б) и изображения теплового ИК диапазона (в) Landsat-TM

Применение тепловизионной томографии значительно повысило информативность изучения глубинного строения структуры, в пределах которой ранее обнаружены залежи УВ. В результате расчета объемной модели установлено: по рельефу местности и глубинному скучиванию пород коры наиболее вероятное западное направление удара метеорита о Землю, вихревая форма структуры коры с изменением среды до 12–16 км, листрическая форма разломов, низкотемпературная камера чашеобразной формы в основании модели (рис.5.17).

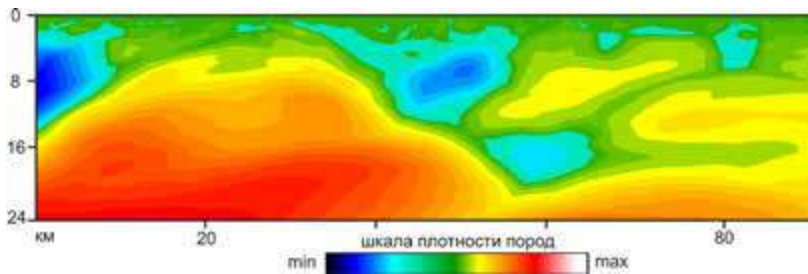


Рис. 5.17. Модель блоково-разломных структур кратера Siljan Ring

Из морфоструктурного анализа карт современного рельефа местности, ISN и блоково-разломной структур на разных глубинах отчетливо проявляются признаки кольцевой формы модели с незначительной вытянутостью большей оси в северо-западном направлении (рис.5.18). Максимумы вершин возвышенностей (*гор*), разбитых мелкими и крупными ущельями, речными долинами, выстраиваются в легко уловимую цепочку, которая напоминает по форме спираль. Стрелками показаны наиболее вероятные направления формирования в плане деструктивных зон сферической и лучевой конфигурации.

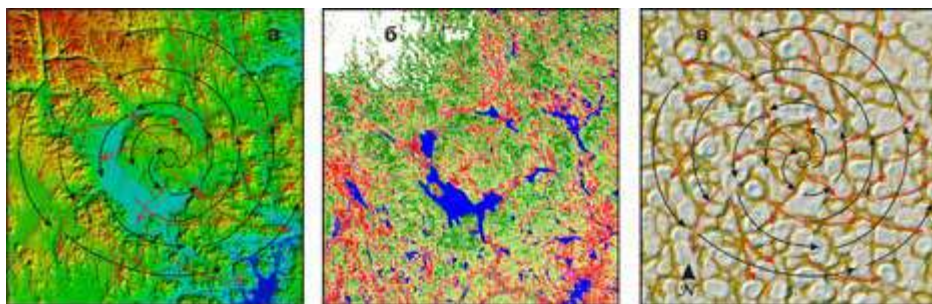


Рис. 5.18. Районирование тектонических нарушений по картам рельефа (а), ISN (б) и блоково-разломных структур на срезе 2 км (в) для кратера Siljan Ring

Главной особенностью районирования современного структурного плана является ярко выраженная кольцевая структура кратера Siljan Ring с диаметром центрального блока порядка 35–40 км, представляющая собой часть жесткого гранитного массива. Структура представлена системой концентрических и радиальных зон разных рангов, которые создают секторы, неизменно увеличивающиеся в своих размерах и за пределами кратера. Поэтому внешнюю часть структуры мы визуально прослеживаем на расстоянии более 100 км.

На территории кратера Siljan Ring наиболее перспективными для поисков УВ необходимо считать краевые проницаемые зоны депрессии, представляющие собой ограничения центрального блока кратера [124]. На юго-западе этой зоны, в наиболее широкой ее части, геохимической съемкой обнаружены аномальные потоки углеводородных газов (рис.5.20). Пла-

новое их расположение соответствует локальным приповерхностным глубинным камерам (рис.5.19). В ее восточной, наиболее узкой части известны проявления нефти. Возможно, участки изменения ширины зоны отражают процессы тектонического расширения и сжатия земной коры, влияющие на миграцию и геохимию флюидов, нефти и газа. Вполне естественным и логичным является предположение, что определенные структурные условия повлияли на процесс формирования нефте- и газопроявлений. Выход происходил снизу, поперек слоев, в большей мере по спирали и связывается с региональной кольцевой синклиналью. Разделение легкой газовой и тяжелой нефтяной фракции, вероятно, произошло на ранней стадии формирования залежи, в объемной камере. Глубинные пути миграции и естественная локализация залежи преимущественно различны. Поэтому разведка растворенного в воде углеводородного газа является крупнейшим резервом нетрадиционных ресурсов.

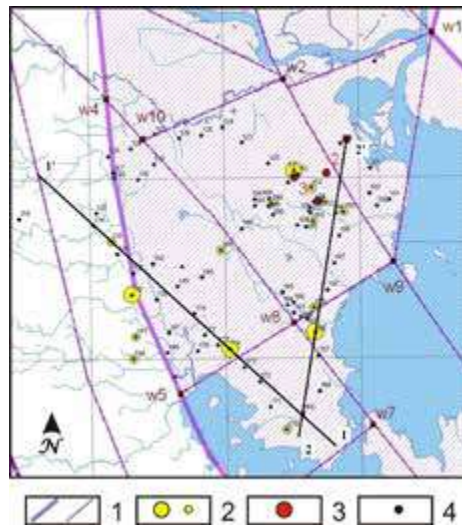


Рис. 5.19. Схема расположения ТВТ профилей и геохимических аномалий УВ (по данным В. Кучерова) западной части импактного кратера Siljan Ring. Условные обозначения: 1 – морфоструктурные блоки различного ранга, 2 – геохимические аномалии УВ разной интенсивности, 3 – разведочные скважины на газ, 4 – расположение точек отбора проб

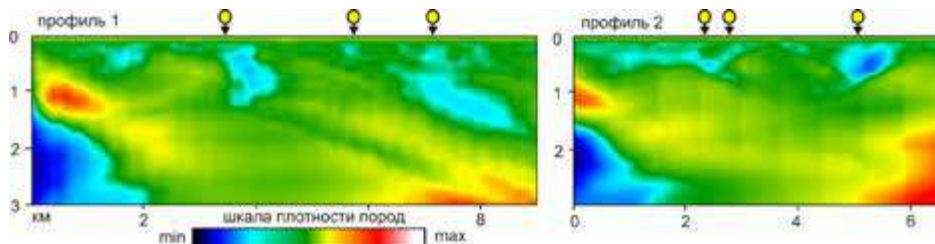


Рис. 5.20. Блоково-разломные структуры по профилям 1 и 2 через геохимические аномалии УВ газов импактного кратера Siljan Ring

Используя информацию по кратеру Siljan Ring, мы составили палеогеодинамическую модель образования структурных форм импактного события (рис.5.21). Исходя из общих черт формирования метеоритных кратеров в слоистой мишени, деформационные процессы в коре можно разделить на ряд этапов [129].

Исходная стадия. Развитие региона происходило за счет внутренних, эндогенных процессов, связанных с магматическими и тектоническими действиями в литосфере. Они формировали структуру земной коры региона, входящего в состав Финноскандии. Более трех сотен миллионов лет назад произошли столкновения метеоритов с Землей. Ударная волна от точки соударения двигалась во все стороны, и в первый момент ее фронт имел сферическую форму. Однако очень быстро эта форма искажается из-за неоднородности свойств пород мишени (*Земли*) и амплитуда ударной волны падает на краю кратера. Механическое и тепловое воздействие на породы мишени также быстро уменьшается. Поэтому в образующемся метеоритном кратере, в центре, возникает зона испарения вещества (*где породы нагреваются до многих тысяч градусов*), затем располагается зона плавления вещества (*при нагреве 1500 °C и выше*) и, наконец, зона дробления пород (*в которой нагрев не превышает десятков – первых сотен градусов*). Продукты дробления, плавления и испарения горных пород мишени (*и, конечно, ударника*) вовлекаются ударной волной в центробежное движение – вверх, в атмосферу планеты и в стороны, за пределы кратера. Расширение пара опережает движение расплава и твердых обломков и благодаря очень высокой скорости соз-

дает эффект «взрыва». Следовательно, импактный процесс, начавшись как удар, заканчивается как взрыв.

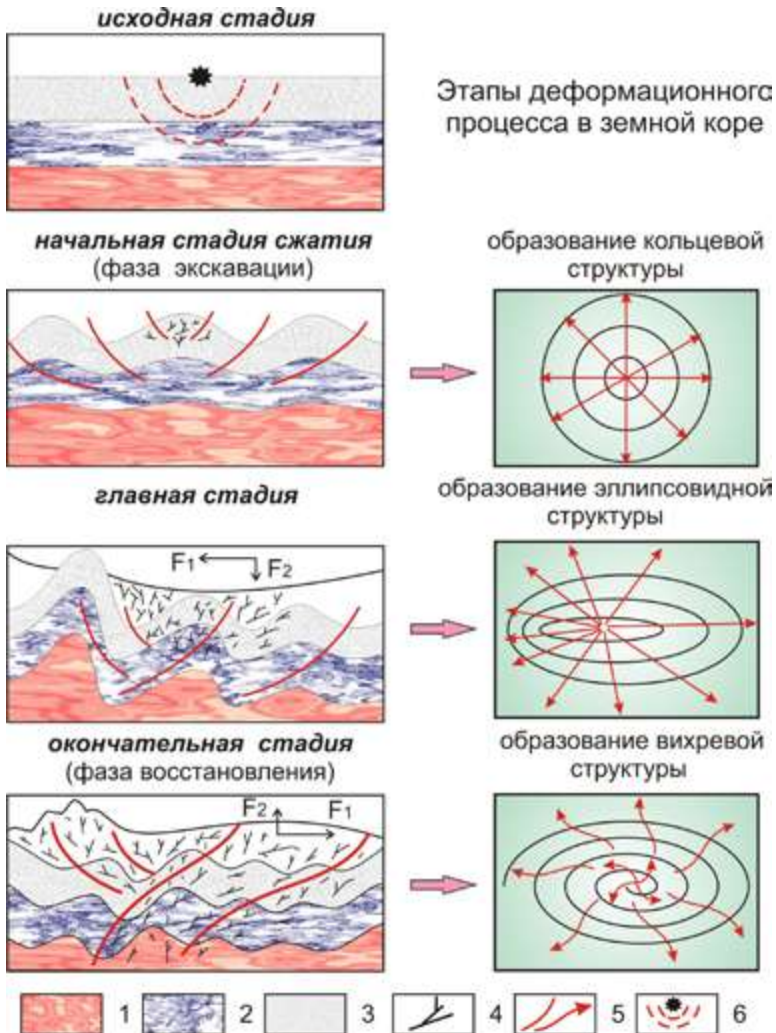


Рис. 5.21. Геодинамическая модель формирования кратера Siljan Ring. Условные обозначения: 1–3 – горизонты земной коры, 4 – зоны трещиноватости слоев, 5 – разломы, 6 – метеорит и направление ударной волны

Начальная стадия сжатия (фаза экскавации). Описанная последовательность элементарных процессов характерна для любой точки в кратере, но в целом все эти действия идут одновременно по всему кратеру – сразу, мгновенно благодаря очень высокой скорости движения ударной волны, измеряемой километрами в секунду. После затухания ударной волны формирование астроблемы продолжается: падают выброшенные в атмосферу обломки, оседают борта воронки, деформируется ее дно, перемешиваются в движении обломки и расплав, кристаллизуется расплав, остывают породы кратера – импактиты. Это стадия переработки (*модификации*) метеоритного кратера. Она происходит уже намного медленнее. Если образование воронки занимает секунды (*в самых крупных кратерах – десятки секунд*), то стадия модификации – это уже геологический процесс (по скорости протекания) и он растягивается в тысячи и миллионы лет. Амплитуда вновь образованной складчатой формы горизонтов постепенно затухает с глубиной.

Особенности геологического строения астроблем зависят от многих причин, среди которых главными являются две – энергия соударения и угол встречи ударника с мишенью. Энергия соударения определяет общие размеры метеоритного кратера и сложность его внутреннего строения. От угла встречи зависит форма астроблемы в плане. Большая часть кратеров имеет округлую форму, что указывает на крутое движение ударника, близко к вертикальному положению. Пологое падение приводит к появлению кратера, вытянутого по направлению падения ударника. При этом установлено, что чем меньше угол встречи при соударении, тем сильнее вытянут кратер.

Главная стадия формирования кратера. Ударное сжатие сменяется разрежением (*разгрузкой*), которое сопровождается механическим преобразованием материнских пород, их дроблением и адиабатическим охлаждением вещества. Окончание стадии экскавации связано с прекращением роста воронки.

Стадия модификации протекает по-разному для малых и больших кратеров. В малых кратерах (*диаметром менее 3–5 км*) астроблемы имеют простую чашеобразную форму, в которых происходит соскальзывание в глубокую воронку несвязного материала стенок – ударного

расплава и раздробленных пород. Перемешиваясь, они образуют импактную брекчию. Глубина у них обычно составляет около 1/3 диаметра, а отношение глубины воронки к видимому диаметру – примерно 0.30–0.33. Это отношение является одним из признаков, позволяющих отличать импактные кратеры от вулканических структур, у которых оно обычно не менее 0,42.

При больших диаметрах воронки (более 10 км) начинает играть роль гравитация. Из-за гравитационной неустойчивости происходит выпучивание вверх дна кратера с образованием центрального поднятия (*центральная горка*), которое образуется благодаря упругой отдаче пород мишени в области максимального их сжатия (*под точкой удара*). При диаметрах воронки более 15 км появляются кольцевые поднятия. Иногда в кратере наблюдаются как центральное, так и кольцевое поднятия одновременно. Отношение глубины к диаметру с увеличением поперечника быстро падает до 0.05–0.02, и полость астроблемы становится уплощенной. Под кратером располагается зона трещиноватости, которая постепенно затухает с глубиной. Наличие на глубине локальной низкотемпературной подушки (*разуплотненной зоны*) – один из характерных признаков, установленных нами в процессе исследования.

Конечная стадия (фаза восстановления). Наступает консолидация – ослабление или полное прекращение процессов деформации среды. Предполагается, что сценарий стабилизации верхней части земной коры должен быть одинаковым для всех событий. Но в стадию формирования блоков вступают новые силы, связанные с региональными тектоническими процессами, характерными для развития Финноскандии. В частности, блоки коры кратера подвержены вихревой форме формирования в фазу восстановления. Она во многом определила современную структуру кратера.

Другим внешним фактором является ледниковый период – произошла сильная денудация дневной поверхности, после которой многие видимые формы рельефа были стерты эрозией и сейчас не обнаруживаются. Но в результате спектральной обработки снимков восстанавливаются характерные особенности глубинного строения кратера Siljan Ring. К примеру, образование крупной вихревой структуры, очертания которой отчетливо видны на горизонтальных картах физических параметров среды.

В заключение сформулируем основы диагностики импактного события по спектрозональной космической съемке.

- Используя классические принципы геоморфологии рельефа местности, изображения цветового композита RGB, ИК снимки можно по совокупности признаков визуально оценить географическое расположение кратера, его видимый диаметр и, морфологию структуры, направление падения метеорита на поверхность Земли.
- Построение моделей блоково-разломных структур и сравнительный анализ тепловизионного зондирования с типовыми моделями импактных кратеров позволяет диагностировать в объеме кратера и установить его глубинные геометрические параметры. Также идентифицировать в земной коре разуплотненные камеры и зоны распространения флюидов в горизонтальном и вертикальном направлениях, оценить отличительные особенности геологической природы кратера от формирования вулканических структур, увязать особенности формирования молодых и древних структурно-формационных зон.
- Использование графических образов спектральных параметров, состояния растительности и почвы в увязке с глубинным строением геологической среды позволяет изучить физическую природу формирования геологической среды. Оценить степень современной активности региона, возможный механизм морфоструктурного развития кратера, провести многоуровневый (региональный и локальный) мониторинг природной среды и получить информацию об экологическом состоянии изучаемой территории.
- Совокупность полученной информации дает возможность экспертной оценки региональных условий формирования и сохранности залежей воды и углеводородов в пределах кратера, корректности решаемой задачи в построении тепловизионной модели и ее корреляционной связи с другими геофизическими методами.

5.5. Исследование импактного кратера Madona

Значительная часть изучаемой территории Республики Латвия является западной окраиной Восточно-Европейской платформы, которая со-

держит моренные слабохолмистые равнины с высотами 100–200 м над уровнем моря. На востоке страны располагается Видземская возвышенность, в пределах которой нами впервые установлено местоположение ранее неизвестного кратера импактного генезиса. В дальнейшем он получил название Madona, от близости географического расположения одноименного населенного пункта.

Основываясь на тепловизионной томографии геологической среды и развиваемых признаках диагностики импактного события [41], устанавливается следующая природа кратера Madona. Его формирование, очевидно, произошло после падения гигантского астероида на границе Латвии и Эстонии с возникновением кратера Валга диаметром свыше 180 км. В настоящее время на южной границе кратера выявляются наложенные структурные образования земной коры несомненно формирующие облик нового кратера Madona (рис.5.22).

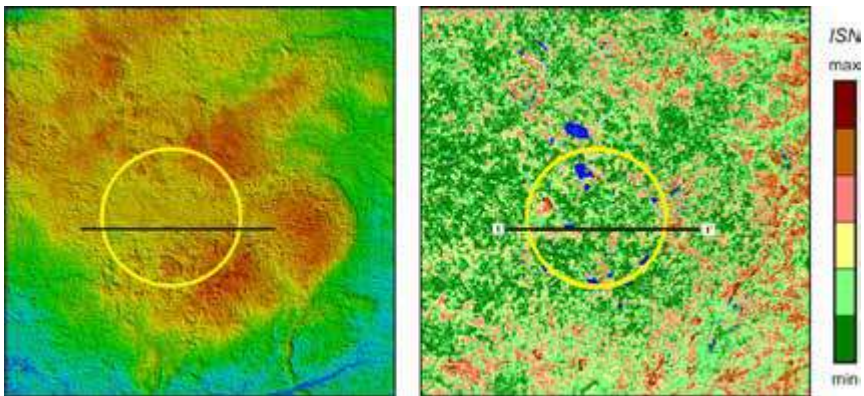


Рис. 5.22. Карты рельефа местности и нормализованного индекса стресса растительности на 19.08.2002 импактного кратера Madona

На мозаике космических снимков кратер выражен округлой депрессией с диаметром внутреннего кольца 12.5 км, внешнего – 20–25 км. Этот вид структуры проявляется в результате дугообразной формы рельефа местности, краевые части которой контролирует система мелких озер, располагающихся по всему периметру. По дневной поверхности структура сильно эродирована. Вероятно, что импактиты кратера были уничтожены в результате интенсивной речной и ледниковой деятельности, увеличившей также и диаметр депрессии в результате размыва ее бортов.

Наибольшее скупивание пород осадочного чехла наблюдается в северо-восточной и юго-восточной части территории. На фоне приподнятого рельефа местности в 140 м над уровнем моря фокусируются реликтовые следы кратера. Отдельные возвышенности на бортах структуры достигают отметок 250–265 м, а к центру уменьшаются до 200 м. Центральное поднятие фундамента, не имеющее куполообразной формы, характеризуется впадиной, которая окружена кольцевым желобом. С внешней стороны к желобу примыкает зона террас с изменяющейся шириной и наклоном плоскостей соскальзывания в сторону центра кратера. Зона террас рассечена неглубокими радиальными отрогами и речными долинами. Все это указывает на направление падения метеорита, происходившее с запада на восток.

Характеристика зоны разуплотнения импактного кратера *Madona*

Таблица 4

Наименование	Широта	Долгота	Диаметр D , км	Глубина H , км	Ширина R , км	Камера V , км ³	Флюид V_{ϕ} , км ³
Madona (Латвия)	56°57' с.ш.	25°50' в.д.	12,5 км	3–5	5–6	4,7	0,1–0,24

Из сравнения блоково-разломных структур следует отметить сходство модели кратера *Madona* с ранее рассмотренными кратерами малых размеров. Модель содержит низкотемпературную камеру с центром зоны разуплотнения на ПК 19 км; листрический вид тектонических нарушений, описывающий в разрезе чашеобразную форму структуры; аномально плотные породы в краевой части кратера; устойчивую связь диаметра кратера с размерами внутрикоровой разуплотненной зоны (рис.5.23).

Спектральная характеристика теплового поля отчетливо проявилась в амплитуде аномалий ISN по данным Landsat-ETM+, минимальные значения которых совпадают с расположением кратера. Это обстоятельство объясняется мощным развитием растительности в результате образования структуры в виде впадины, содержащей на поверхности болотистую почву. Локальные максимумы ISN контролируют выходы плотных пород в краевых частях разреза.

Мониторинг экологического состояния территории проводился путем интерпретации разностного показателя индекса «стресса» (ΔISN) на 19.08.2002 и 21.08.2009 в увязке с глубинным строением геологической сре-

ды. Карта временной динамики ΔISN территории кратера условно может быть ранжирована на два участка. Восточная окраина площади проявляется преимущественно локальными зонами больших значений ΔISN (красный цвет), в результате чего в плане образован специфический радиальный сектор ландшафтно-растительной системы. Нарастающая динамика индекса за семилетний период указывает на ухудшение экологического состояния этого участка среды. Для оставшейся большей части территории имеем, как правило, нормальное значение индекса ΔISN . На этом фоне минимальные величины пикселя (зеленый цвет) выстраиваются в слабо уловимую цепочку, образуя круг радиусом 20–25 км и совпадая с внешним кольцом структуры кратера. Схема отображает конфигурацию неотектонических активных зон, имеющих более интенсивный режим флюидных потоков минерализованных подземных вод. Отдельные участки аномальных значений ΔISN расположены в пределах населенных пунктов и указывают на ухудшение экологической обстановки в этих местах.

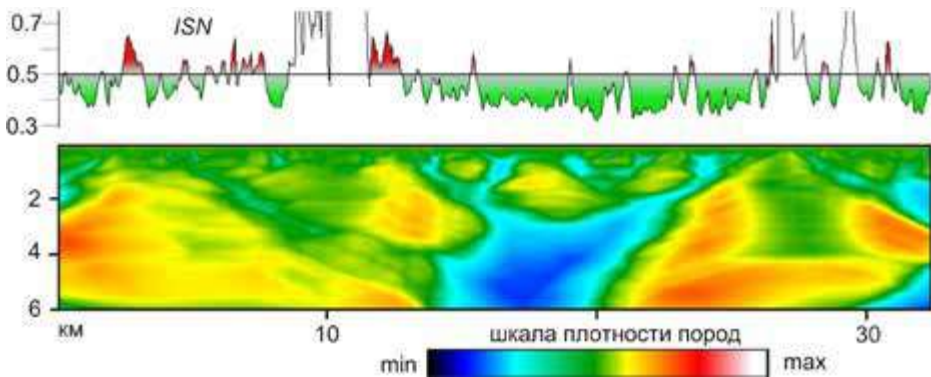


Рис. 5.23. Разрез блоково-разломных структур кратера Madona

Подтверждение предложенной гипотезы импактного происхождения кратера Madona возможно на основе проведения независимых геолого-геофизических наземных полевых работ, включая отбор проб и геохимический анализ импактитов осадочного чехла, являющихся важнейшим диагностическим признаком ударного метаморфизма.

Анализируя полученный материал, можно прийти к выводу о том, что представленная технология тепловизионного зондирования Земли по-

звояет исследовать современное геометрическое строение и физическое состояние геологической среды импактных кратеров вне зависимости от их размеров и географического расположения. Установлено, что падение малых метеоритов, как правило, приводит к образованию сферических локальных камер только в верхней части разреза, не превышающих размеры воронки на дневной поверхности. Падение гигантских метеоритов обуславливает сильную изменчивость земной коры на полную ее мощность, что приводит к формированию многих месторождений полезных ископаемых.

Устанавливать глубину воздействия на геологическую среду импактного события, приводящего к образованию специфических объектов в виде многоэтажных камер. Природа их образования в целом может быть не связана с эндогенными региональными геологическими процессами развития Земли.

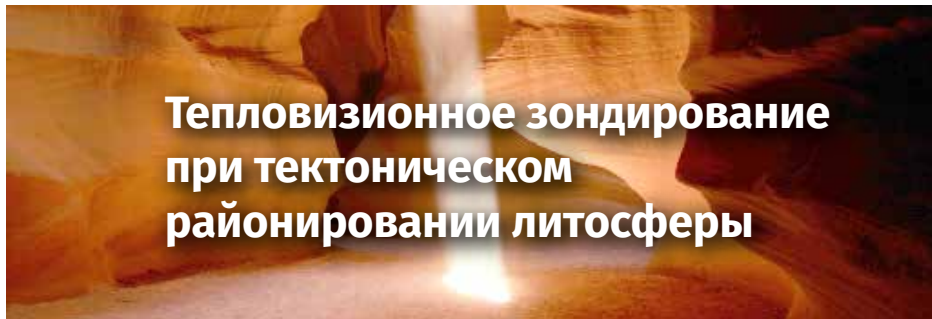
Восстанавливать по тепловизионным данным геодинамическую модель формирования взрывных метеоритных кратеров в слоистой мишени, оценивать направление и угол встречи ударника с мишенью, прослеживать вихревой тип структуры преобразованной коры, места пересечения границ геологических блоков.

Основываясь на концепции абиогенного глубинного происхождения углеводородов в недрах Земли можно оценивать структурные возможности формирования и сохранности залежей УВ в условиях импактных кратеров. Основным признакам благоприятных условий образования и сохранности глубинных УВ отвечает следующая модель:

- образование структурных или литологических ловушек в верхней части геологического разреза [35];
- присутствие в земной коре разноглубинных объемных камер – участков накопления флюидов в пористых средах, которые соединены между собой узкими каналами флюидоперетоков не только вертикального, но и горизонтального залегания;
- развитие региональных внутрикоровых низкотемпературных горизонтов, по аналогии с коровыми проводящими слоями в электроразведке и волноводами в сейсморазведке, природный механизм образования которых связан с водными растворами, выделяющимися при геотермической активизации зем-

ной коры из минералов, содержащих воду или гидроксил в кристаллической решетке [126]. При этом флюид, обеспечивающий неоднородность слоев, может иметь внутрикоровое или мантийное происхождение;

- земная кора региона должна иметь более тонкую мощность по сравнению с современными структурно-формационными зонами. Сокращение толщины литосферы с образованием астеносферного слоя способствует физико-химическим процессам, благоприятным для происхождения УВ. В этом случае слабо расчлененная верхняя мантия не утрачивает связи с геологическими структурами земной коры [32]. Происходит химическое и физическое изменение горных пород в области высоких температур, давлений и интенсивных деформаций.



Слои Земли: «Аллах – Тот, Кто сотворил семь небес и столько же земель...» (Сура «Ат-Талак», 65:12)

Геоидная форма Земли: «Потом Он землю распротер, растянув.» (Сура «Ан-Назиат», 79:30)

Строение гор: «Разве Мы не сделали землю ложеж вам, а горы – колышками?» (Сура «Ан-Наба», 78:6-7)

أَلَلَّهِ الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ وَمِن
الْأَرْضِ مِثْلَهُنَّ يَنْزِلُ الْأَمْرُ بَيْنَهُنَّ لَعَلَّكُمْ أَنْ
أَلَلَّهِ عَلَّمَ كُلَّ شَيْءٍ قَدِيرٌ وَأَنَّ أَلَلَّهِ قَدِيرٌ
أَخَاطِبُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَالِمًا

6.1. Региональная тепловая зональность в условиях металлогенической специализации

Обзор проведенных тепловизионных исследований убедительно доказывает большие возможности ТВТ как структурного метода в изучении Земли. Тектонический каркас теплового поля на различных масштабных уровнях изучается по глобальным спутниковым снимкам, а также путем сопоставления с априорными данными наземных геофизических методов (*сейсмического и магнитотеллурического зондирования*). Основываясь на современной тектонической концепции формирования Земли и принципе актуализма, создаются физико-геологические модели, отражающие тепловую делимость литосферы на многочисленных уровнях, устанавливаются связи слабо расчлененной верхней мантии со структурами земной коры и их металлогеническая специализация [32]. Ниже приведем обоснование применения ТВТ в мелкомасштабных прогнозных исследованиях рудных и нерудных полезных ископаемых.

Реальные среды имеют зоны с инверсией тепловых слоев по глубине. Поэтому классификация горизонтов проведена с учетом их расположения в разрезе тектоносферы. Условно выделены пять типов гетерогенных тел: надкоровый, внутрикоровый, корово-мантийный, астеносферный и мантийный. Все они расположены в разных геологических условиях, времени консолидации структур и разбиты разломами. Дислокационные зоны представлены тектоническими нарушениями в форме вертикальных, наклонных или листрических зон. Как правило, зоны затухают в осадочном чехле или проникают в земную кору и мантию.

Одним из важных результатов изучения гетерогенных систем является установление в строения верхней мантии вертикальных и горизонтальных неоднородностей регионального распространения. Наиболее выражены они на глубине до 200 км. Размер латеральных неоднородностей варьирует в широких пределах – от десятков (локальные объекты) до тысяч километров (региональные), причем их физические параметры могут отличаться от среднего значения в 2–4 раза. Распределение таких объектов обнаруживает связь с крупными элементами геологических структур в платформенных, складчатых и горно-складчатых областях, строение которых носит сложный характер.

Принимая величину 180–200 км за нормальную мощность литосферы, можно выделить ее специфические особенности в строении: толстую (зрелую), нормальную и тонкую (с преобладанием астеносферы). Термин астеносфера требует некоторого пояснения. Астеносфера выделяется по геофизическим данным как реологический слой пониженной вязкости с низким электрическим сопротивлением и плотностью, с высоким тепловым потоком. Верхняя кромка слоя залегает на глубинах 50–180 км и вызывается частичным плавлением вещества.

Зрелая литосфера характеризуется большой собственной мощностью (свыше 200–240 км), высокими значениями плотности по глубине, слабой тепловой расслоенностью. Избыточная плотность субстрата соответствует градиентно-слоистой модели среды, характерной для стабильных древних кратонов. По мере продвижения к молодым платформам, континентальным окраинам и складчатым поясам условия нарушаются.

Тонкая литосфера обладает значительным сокращением мощности (до 80–100 км) за счет влияния астеносферы (*слой Гуттенберга*), повышенным тепловым потоком в блоках земной коры и литосферной мантии, сильной тепловой расслоенностью, более пластичной и гомогенной оболочкой с образованием региональных внутрикоровых слоев. В свою очередь, сокращение мощности литосферы может происходить в локальных зонах под влиянием глубинных разломов (*дислокационные зоны*) и в региональных областях – под действием высоких температурных потоков.

Нормальная литосфера (*переходный тип*) характеризуется промежуточными значениями между ее аномальными проявлениями. В тепловом разрезе встречаются коровые, корово-мантийные слои и линзы. Природу их образования связывают, как правило, с изменением вещественного состава пород.

Изучение строения зон в коре и литосферной мантии регионов показало, что аномальные значения эндогенного теплового потока могут быть вызваны самыми разнообразными причинами. Следует разделить природу зон на два основных типа. К первому типу относятся объекты, повышенная теплопроводность которых вызвана специфическим составом пород земной коры или процессами дегидратации серпентинита (*амфиболита*) в условиях избыточного давления. Возможно наличие графитизированных пород или скопление рудных элементов. Ко второму типу принадлежат объекты аномальной теплопроводности, где наблюдаются высокие значения глубинного потока. В этом случае вероятно наличие минерализованных флюидов, аномальных глубинных температур (*превосходящих солидус*), вызывающих частичное плавление пород при тектонической активизации верхней мантии. Еще одним объектом повышенной теплопроводности является зона, сопоставимая с тектонофером Земли.

Природа тепловых неоднородностей не может быть установлена на основе только геотермической информации. Необходимо привлечение электрических и сейсмических данных. С их помощью можно определить, связан ли эффект тепломассопереноса с аномальным прогревом недр, возможным частичным плавлением пород или появлением значительных концентраций флюидов при тепловой дегидратации (*конвективный*

процесс). Аномальные объекты, к которым тепловое объяснение окажется неприменимым, должны рассматриваться с учетом особенностей состава пород (*кондуктивный процесс*). Принимая за основу дальнейших рассуждений эту оценку природы среды, рассмотрим форму расположения объектов в геологической среде.

Модели тепловизионной томографии отчетливо показывают подобие в расслоении и дискретности геологических сред, но отличаются масштабом природных процессов от известных геофизических аналогов, информация о которых получена дискретным путем [123]. В качестве примера приведем материалы, в которых обнаруживается связь блоков ЗК и мантии по геотраверсу «Татсейс-2003» Волго-Уральской нефтегазональной провинции.

Особенности строения новейшего структурного плана Татарского свода обусловлены его положением в зоне сопряжения разноориентированных рифтовых структур Волго-Уральской мегазоны. Подготовительной стадии развития рифтового режима предшествует образование обширных выпуклых структур (*сводов*), имеющих неправильную овальную форму. В дальнейшем образуются расколы с растяжением блоков, вдоль которых в течение длительного геологического времени формируются сложные грабены (*авлакогены*). Районирование провинции совпадает с зоной сочленения трех крупных структурно-тектонических элементов: восточного склона Токмовского свода на западе, Северо-Татарского свода на севере и Южно-Татарского свода на юго-востоке. Каждый из них четко выражен по поверхности фундамента, но отличается в осадочном чехле морфологией и полнотой геологического разреза. Границы ЮТС ограничены Казанско-Кажимским авлакогеном и Камским глубинным разломом (рис.6.1 а), которые соотносятся с прогибами и впадинами. К южной части свода прилегает Серноводско-Абдуллинский авлакоген широтного простирания. Предполагается, что все структурные элементы были вовлечены в процесс вещественной перестройки при формировании литосферы.

Для ЮТС геотермические модели теплового потока с таким высоким разрешением построены впервые. Результаты моделирования не противоречат карте инструментальных измерений температур в глубоких сква-

жинах, представленной в форме изотерм на абсолютной отметке -1 км (рис.6.1 б). Зонам высоких изолиний $T^{\circ}C$ с незначительным смещением, как правило, отвечает разгрузка ТП ТВТ (рис.6.1 в). В целом применяемая ТВТ технология обладает преимуществами при построении информационных карт региональной теплопроводности среды. Она основана на изучении трехмерного распределения поля, обладающего высокой степенью разрешения исходных данных на местности, и отличается уровнем исследуемых глубин ЗК. Этим следует объяснить несовпадение ряда полевых данных, например, по территории Северо-Татарского свода.

Формирование пространственной структуры теплового поля в определенных участках сильно изменяется по интенсивности. Конвективный процесс тепломассопереноса в недрах объясняется раздробленностью купола крупными зонами разломов с восходящим движением флюидов. Переменный глубинный поток в центре Русской платформы меняется от 29 до 74 мВт/м², при среднем значении 54 мВт/м² [100]. Метод ТВТ не противоречит вариациям поля в пределах изучаемого региона. Также остается неизменной корреляция высоких значений тепла с центральной частью Ромашкинского нефтяного месторождения-гиганта. Свидетельством этому служит разрез тепловых источников, построенный по функции вейвлета Тихонова-Каримова (рис.6.1г). Сопоставление моделей ТВТ со структурными элементами ЮТС показало высокую неотектоническую активность региона. Область высокого теплового потока и низкая плотность среды (*увеличение слоистой трещиноватости*) совпадают с диагональным Ромашкинским глубинным разломом (рис.6.1 е). Активная дислокационная вертикальная зона начинает нарастать от фундамента, распространяясь на всю литосферу. В пределах разлома горизонтальные проницаемые корово-мантийные слои смещены по глубине со значительной амплитудой. К основанию коры в зоне низкой тепловой ячейки амплитуда достигает 5 км.

В основу дальнейшего анализа и систематики природных деформаций и геодинамик тектонических элементов земной коры Татарского свода положен термодинамический подход с выделением по вертикали трех зон (эпи-, мезо- катазона), для каждой из которых характерны свои генетические типы складчатости и своеобразная вертикальная зональность [71]. Выделяемые тектонические стили крайне специфичны по

уровню метаморфизма, типу разломов, размерам структурных элементов, физическим параметрам. Используя в качестве классификационного признака эти элементы и сравнительную характеристику типовых тектонических стилей как функции РТ условий дислокационного процесса, нами проведена систематика природных деформаций.

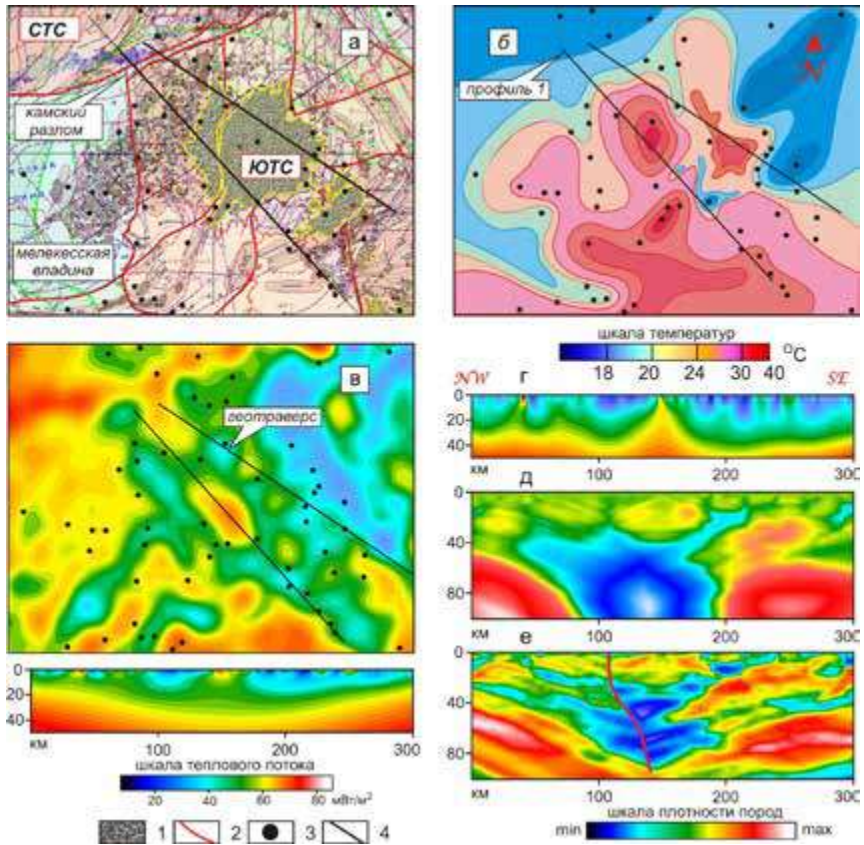


Рис. 6.1. Тепловой режим литосферы Южно-Татарского свода. Тектоническая схема региона (а), фрагмент карты температур на отметке -1 км (б) по данным [100], карта-срез верхней части ЗК и разрез потока теплового поля (в), модель тепловых источников (г), строение блоково-разломных структур в интегральном (д) и дифференциальном (е) виде. Условные обозначения: 1 – Ромашкинское месторождение углеводородов, 2 – тектоническое нарушение среды, 3 – скважина, 4 – профиль-1 ТБТ

Термодинамические условия в земной коре Татарского свода контролируют важнейшее из тектонических свойств – реологическое состояние (вязкость) веществ, которое проходило в рамках ЗК полный цикл эволюции [71,72]. Холодная зона эпизона (*изотерма около 100⁰С*) снизу ограничена фронтом кливажа (*начальный метаморфизм*), что характерно для слабо плотных и маловязких на поверхности осадков. В среднетемпературной мезозоне вязкость пород возрастает за счет полной литификации осадков под влиянием разогрева (около 100–500⁰С). Вследствие разогрева пород с максимально пониженной вязкостью преобладает высокотемпературная катазона (свыше 550⁰С), которая соответствует эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой и гранулитовой фациям метаморфизма. Для катазоны свойственен пологий характер тектонических потоков, тогда как для мезозоны и эпизоны – круто наклоненный.

Прямые сопряжения потоков, характерные для катазоны и мезозоны, наблюдаются на Татарском своде. Особенно очевидно это в центре ЮТС, где происходит локальный захват нижнего слоя мезозоны, но пространственное расположение структурных форм относительно ограничено. Предположительно, данный эффект объясняется процессами, связанными с интенсивными тектоническими движениями земной коры при формировании глубинных разломов (рис.6.2).

Древние геоблоки катазоны попадают в сферу активного влияния тектономагматической деятельности коры (*механической и тепловой переработки*), где существенно уничтожается пологий тектонический стиль. Таким образом, с одной стороны, мы видим резкое дисгармоничное поведение катазоны, с другой стороны, наблюдаются синхронно развивающиеся процессы складчатого и разломного образования мезозоны. Способность ЗК передавать интенсивность движения слоев мантии прямо зависит от вязкости катазоны, которая определяется ее реологическим состоянием. Если бы ЗК представляла собой однородное, достаточно жесткое тело, то движения мантии передавались бы от подошвы к кровле коры в неискаженном виде. Область развития катазоны, обладающей аномально пониженной вязкостью, приводит к значительному искажению, ослаблению контрастности и погашению интенсивности мантийных движений в верхней части коры за счет латерального растекания вещества. Вследствие этого расслоенность среды региона обладает существен-

6. Тепловизионное зондирование при тектоническом районировании литосферы

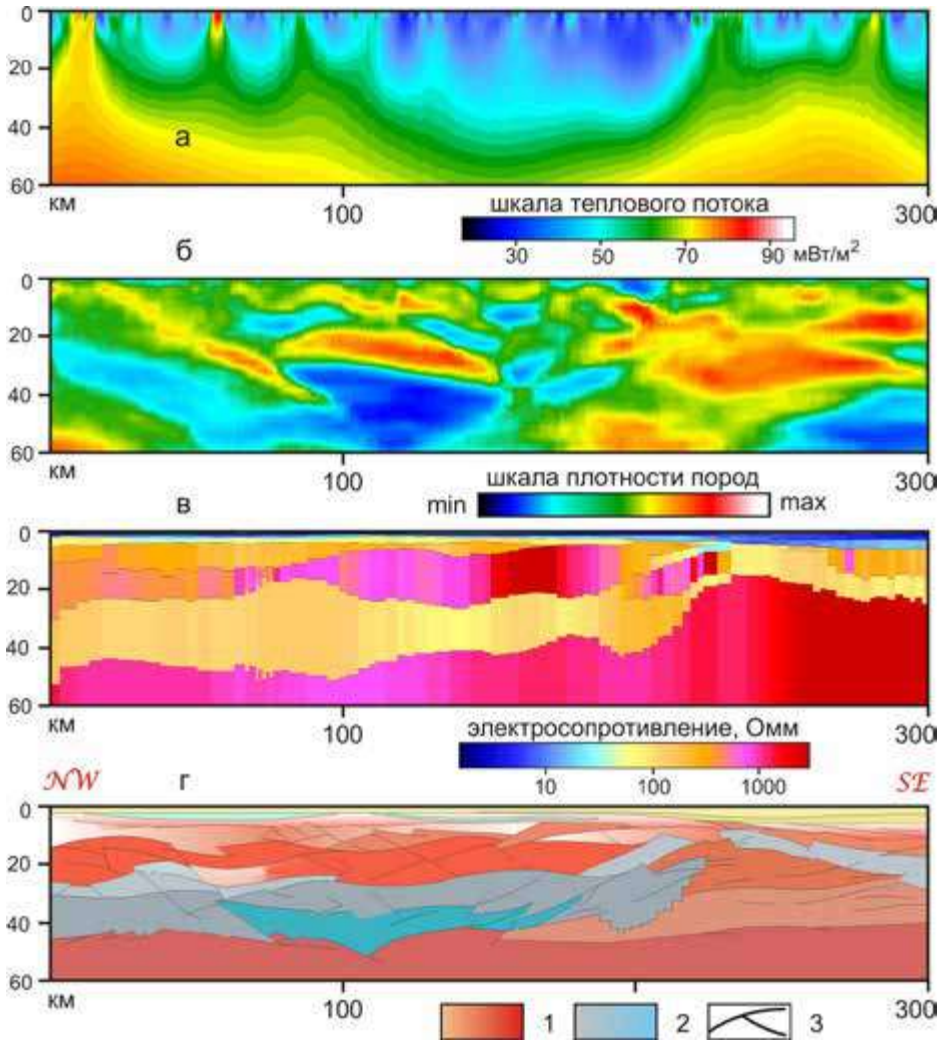


Рис. 6.2. Строение литосферы Южно-Татарского свода по геотраверсу «Татсейс-2003». Модели потока теплового поля (а) и блоково-разломные структуры (б) по ТВТ, электрического сопротивления по МТЗ (в), сводного разреза ЗК (г) по сейсмическому и магнитотеллурическому зондированию [123]. Условные обозначения: 1 – слои высокого сопротивления, 2 – электропроводящие коровые слои, 3 – границы горизонтов

ным отличием. Расслоенность хорошо выражается в морфологии границ, установленных по сейсмическому, электромагнитному и тепловому полям. Разуплотненная зона, по данным тепловизионного зондирования, совпала в пространстве с электропроводящим и низкотемпературным слоем в основании ЗК, а границы горизонта (ПК 60–200 км) – с местоположением гигантского Ромашкинского нефтяного месторождения.

Судя по обобщенным геофизическим данным, мощность земной коры Волго-Уральской нефтегазоносной провинции не превышает 42 км. Границы изменения величин проводимости и тепловой плотности отчетливые, резкие. В смежных районах они расплывчатые. К центру ЮТС под углом 8° – 21° происходит плавное погружение слоя проводника и разуплотнения. На севере и юге горизонт коровый, в центре – корово-мантийный. Апикальная ее часть находится на глубинах порядка 20–25 км. В верхней части коры Татарского свода гетерогенный тепловой слой встречается спорадически. Возможно, он создан цепочкой обособленных локальных тел разной конфигурации. Поверхность М испытывает прогиб амплитудой в 3–5 км, а поверхность гранулит-базитового слоя и ряд горизонтальных границ в нижней части гранитно-метаморфического слоя, наоборот, некоторый подъем. Эти изломы глубинных границ отвечают центральной зоне ЮТС.

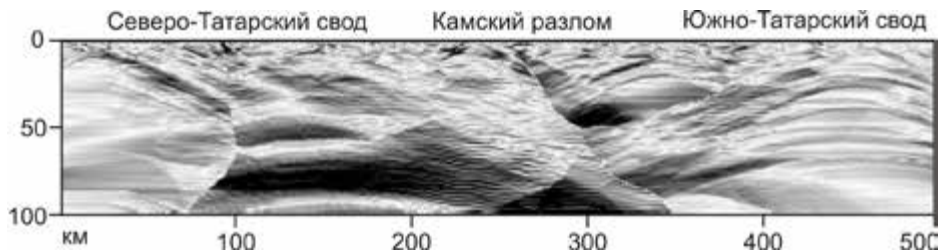


Рис. 6.3. Дифференциальная модель блоково-разломных структур литосферы Татарского свода в монохромном изображении

Современный структурный облик Татарского свода во многом обусловлен сближенными в плане глубинными разломами, которые являются границами структурно-формационных зон. К примеру, вдоль Камского палеорифта осуществлялись крупномасштабные сдвиговые перемещения в латеральном направлении и вертикальной плоскости разреза (рис.6.3).

Породы в зонах разломов интенсивно дислоцированы и тектонизированы, местами превращены в динамосланцы и гидротермалиты. Именно такие породы в зонах разрывных нарушений обладают аномально высокими значениями электропроводности, низкими величинами плотности, теплопроводности и скорости распространения упругих волн.

Следовательно, согласно экспериментальным геофизическим данным, литосфере Татарского свода присуща модель каркасного типа с характерным очертанием блоков. Составными элементами ее являются:

- глубинные разломы (*тектоноферы*) на местах развития современных авлакогенов;
- сопряженные с разломами горизонтально залегающие дислокационные зоны коры;
- более мелкие вертикально падающие коровые разломы, в основании приобретающие листрическую форму.

Все эти структурные элементы, прослеженные от поверхности верхней мантии до платформенного чехла, создают в пространстве каркас с типичным контуром блоков коры. Они развивались как единая взаимосвязанная система тектонических элементов. Разломы при этом выступали в качестве каналов поступления к поверхности флюидных и газовых эманаций.

О природе ТП аномалий в коре и мантии. Определяющим фактором тепловой анизотропии верхней толщи кристаллического фундамента стабильных регионов является свободная вода. Область ее наибольшего влияния занимают верхние слои до глубин 1–2 км, где отмечается зона фронтальной циркуляции метеорных вод. Область проникновения свободной гравитационной воды может достигать 9 км [28]. Глубже ТП литосферы целиком определяется составом пород, флюидами и воздействием на них неравномерно возрастающей температуры [52].

В отличие от гравитационной воды химически связанный флюид не оказывает существенного влияния на сопротивление и теплопроводность пород. Лишь при температуре свыше (500–600) °С роль флюида возрастает в связи с явлением температурной дегидратации – выделением из минералов кристаллизационной связанной воды, что обусловлено различными химическими превращениями с поглощением тепла.

Относительное повышение тепловой проводимости нижних горизонтов ЗК имеет место в стабильных и активных областях литосферы [57,79]. Плотность корово-мантийного слоя уменьшается с приближением к палеорифтовой зоне или к областям современной тектонической активизации (*горно-складчатые структуры*). Ранее считалось, что платформа характеризуется стационарностью ТП. Однако в ряде регионов изменение температуры существенно, что приводит к пополнению ювенильных растворов за счет дегидратации минералов. Предположительно природа слоя связана со сменой на глубине пород относительно кислого состава на породы ультраосновного состава. Это косвенно подтверждается глубинами слоя, который спорадически совпадает с сейсмической границей Мохоровичича. Можно предположить, что волноводы, электропроводящие и температурные слои в коре и мантии являются пологозалегающими дислокационными зонами, расположенными на различных глубинах. Именно этим объясняется их наложение на разновозрастные вещественно-структурные комплексы.

По данным ТВТ и МТЗ, предполагается, что возникновение ослабленной зоны ЗК обусловлено активными динамическими процессами, вызванными подъемом астеносферного слоя (*орогенные области Тянь-Шаня и Алтая*) [93]. Активным зонам литосферы соответствуют глубинные зоны низкой плотности, которые указывают на частичное плавление вещества (*геотермальный вулканогенный пояс Камчатки*). Это согласуется с расчетами и подтверждается высоким региональным тепловым потоком на поверхности земли (130 мВт/м^2).

Кора за последние сотни миллионов лет испытала сильное тепловое возбуждение. Активно проявились метаморфизм пород, вулканическая и гидротермальная деятельность. В результате дегидратации, плавления пород ЗК и выноса большого объема магматического материала на дневную поверхность в коре сформировалась ослабленная зона. Она сложена относительно кислыми и метаморфически измененными породами, содержащими внутри кристаллизационную воду, проявляет повышенную электропроводность, разуплотнение, пониженную сейсмическую скорость.

Флюид, обеспечивающий пониженную плотность ТП и повышенную электропроводность, имеет внутрикоровое или мантийное происхождение. Внутрикоровая природа связывается с дегидратацией пород амфи-

болитовой фации метаморфизма, требующей повышения температуры до 600°C. Согласно сейсмическим данным (*Christensen and Mooney, 1995*) на глубине 25–30 км содержание амфиболитов – основных хранителей связанной воды – достигает 40%. Минералогические реакции указывают, что при дегидратации амфиболитов высвобождается (0,1–0,6)% воды. Понижение сейсмической скорости в коре и увеличение поглощения подтверждают флюидную природу аномалий.

Плотность пород верхней мантии зависит от физических свойств минералов оливина и пироксена, входящих в состав лерцолита [56]. Известно несколько природных факторов, которые дают возможность объяснить высокую электропроводность и тепловую неоднородность на этих глубинах. Это может быть фазовый переход от плагиоклазового лерцолита к шпинелевому, а также присутствие флюидов. Последние, возможно, состоят из расплавленной фазы, воды и CO₂. Флюиды как жидкие, так и газообразные обладают единым механизмом электропроводности и теплопроводности, что приводит к корреляции параметров.

Изучение кимберлитовых и карбонатных магматических формаций показало, что на глубинах 150–200 км, по-видимому, газообразные флюиды в достаточном количестве не присутствуют, но небольшая их доля может привести к снижению энергетического порога плавления пород. Ниже 200 км по электрическим зондированиям аномальный слой в верхней мантии не наблюдается. Это связано с тем, что проводимость диэлектрика существенно повышается с ростом температуры и начиная с этих глубин физические параметры имеют нормальное значение.

Литосферной мантии с высокой плотностью теплового потока отвечают блоки пород истощенной мантии, образованные в процессе длительной дифференциации мантийного вещества и отгонки кислых компонент в верхние горизонты ЗК (плагиоклазовые перидотиты, гарцбургиты). Блокам низкого потока соответствуют палеозойские структуры, сформированные на древней океанической коре или за один тектонический цикл. В другом случае они соответствуют блокам неистощенной мантии, усредненный состав которой отвечает периолитовой (лерцолитовой) модели мантии. Стоит отметить, что низкие значения ТП в верхней мантии не всегда связаны с ее неистощенным составом.

Характеристики коры показывают, что на глубинах 30–60 км при 400–600^oC, температуры недостаточно для плавления среды. Поэтому низкая плотность блоков мантии под структурами, сформированными на палеокеанической коре, не связана с частично расплавленным веществом, но близка по значениям этого параметра современной океанической коре. Градиентные участки являются геодинамическими активными зонами нарушения среды, перехода между первым и вторым типами литосферной мантии. Зоны относительно полого наклонены под блок истощенной литосферы (рис.6.4).

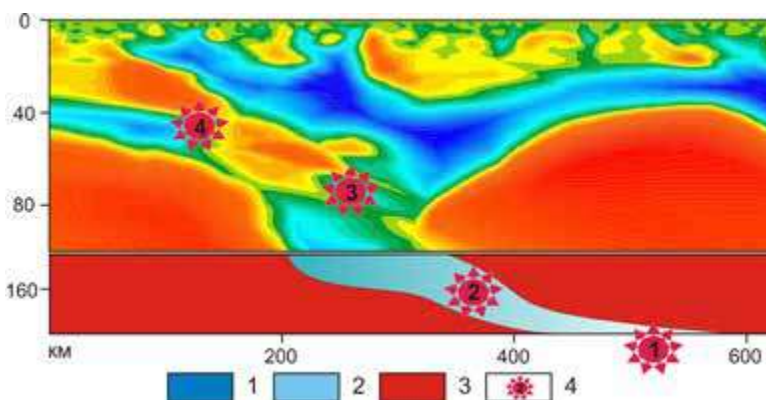


Рис. 6.4. Геодинамическая модель блоково-разломных структур с расположением глубинных источников магмы. Условные обозначения: 1 – слой коры низкой плотности; 2 – слой возбужденной мантии; 3 – мощная истощенная литосфера; 4 – магматический очаг

Многочисленные материалы ТВТ и МТЗ позволяют выделить условные типы тектонических структур литосферы, что существенно расширяет их классификацию.

Первый тип. Плотным, высокоомным блокам истощенной литосферы соответствуют в ЗК реликты древних кратонов, тела сиалического состава, останцы срединных массивов. Истощение мантии произошло в результате длительного формирования сиалической коры, имеющей, как правило, древний возраст. В этом случае слабо проводящие структуры земной коры подстилаются высокоомными блоками литосферной мантии. Как исключение, в нижних горизонтах коры встречается слабопро-

водящий горизонт, который коррелирует с волноводом и связан с дегидратацией пород. Блоки данного типа занимают разное тектоническое положение.

Во-первых, они присутствуют в качестве реликтов древних срединных массивов в фанерозойских подвижных поясах. По геофизическим данным массив является континентальным, с широким развитием гнейсовых, гранито-гнейсовых комплексов и изометричной формой куполов, разделенных зонами древних глубинных разломов. Узкие эклогит-гнейсовые пояса, по существу, являются мегакупольными тектоническими сжатыми зонами. Они вмещают тела эклогитов, расслоенные интрузии мафитового состава, туфы лампроитов и содержат проявления золота кварцево-жильного типа. Алмазы генетически связаны с графитом, а их кристаллизация происходила в пересыщенной углеродом среде.

Все проявления полезных ископаемых распространены в пределах массива не повсеместно, а избирательно. Большинство проявлений алмазов тяготеют к эклогит-гранулитовому поясу, месторождения золота к зонам разломов, а проявление редких металлов к периферии массива. Тепловизионным методом фиксируются глубинные разломы, определяющие рудоносность отдельных частей названных структур.

К примеру, в пределах Якутской и Архангельской алмазоносных провинций России, присутствуют четыре магматические ассоциации: 1 – лампроиты, кимберлиты; 2 – калиевые базальты; 3 – щелочные оливиновые базальты и долериты (*щелочно-габбродная формация*); 4 – толеитовые базальты и долериты (*трапповая формация*).

Большинство из магматических очагов плавления характерны только для докембрийских платформ. Исключением является щелочно-габбродная формация, которая широко распространена в покровно-складчатых поясах. Наблюдается прямая зависимость между интенсивностью проявления толеитовых и щелочно-ультраосновных магм. Последние в полном объеме обнаруживаются только на отдельных участках платформ, где достаточно широко представлены траппы. Кимберлиты и щелочно-ультраосновные комплексы часто сопряжены в пространстве. Последовательность проявления указанных пород в верхних слоях литосферы закономерна: первыми появляются траппы, в конце цикла – кимберлиты.

Породы щелочно-ультраосновных комплексов и щелочные базальтоиды занимают промежуточное положение, но ближе к кимберлитам.

Во-вторых, блоки первого типа образуют окраинно-континентальные пояса, по границе фанерозойской литосферы континентального и океанического типов. К примеру, Алтайский рудный пояс прослеживается на первые тысячи километров при ширине 80–100 км. Он характеризуется линейным рифтогенным стилем развития структур с проявлением колчеданного полиметаллического оруденения. В глубинных структурах Рудного Алтая по МТЗ выявлен блок, сложенный комплексом древних образований гранулит-базитового состава и линейным корово-мантийным, астенолитом. В конце девона и карбона Рудный Алтай развивался по типу энсиалической островной дуги, а в последующее время в качестве коллизионной структуры. Характер глубинного строения Алтая во многом отражает тектонические преобразования этих двух последних этапов и связанную с ним регенерацию рудных месторождений.

Второй тип. Блоки литосферы сложены относительно слабопроводящими комплексами. Земная кора представлена гранитизированными метабазами. Породы верхнего слоя океанической коры перекрываются терригенными граувакковыми и флишоидными формациями. В нижних горизонтах коры выявлены обширные зоны низких электрических сопротивлений. В отдельных районах в составе пород мантии (на глубине более 100 км) присутствуют плотные блоки. Они сформированы на месте палеоокеанических структур, современное тектоническое строение которых определяется скучиванием литосферы на этапе ее сжатия и закрытия океанического пространства.

В современных тектонических условиях это узкие приразломные пояса вдоль офиолитовых швов. Они представляют собой сутуры древних океанических бассейнов, которые перекрыты с поверхности мощными толщами терригенных отложений. Реже составом наземных вулканических моласс, скрывающих в своем основании структуры островодужной стадии. Широким распространением пользуется золоторудная минерализация, которая тяготеет к поднятиям, скученным и преобразованным комплексам реликтов океанической коры, узлам пересечений продольных и поперечных разломов [45].

Третий тип. Блоки низкоомной неистощенной литосферы в форме глубинных мантийных астенолитов, которые часто присутствуют в основании докембрийских комплексов сиалической коры и приводят к их разрушению (деструкции). Они создаются в основании крупных, древних блоков литосферы в процессе формирования зон рассеянного спрединга, проявления внутриконтинентального палеозойского рифтогенеза. Это связано с поступлением в верхние горизонты земной коры базальтового вещества, а в мантии – неистощенного мантийного вещества.

Континентальный рифтогенез проявляется в разное геологическое время. Это явление характерно для центральных частей срединных массивов и связано с поступлением большого объема неистощенного мантийного вещества в верхние горизонты литосферной мантии. Среда имеет очень низкое электрическое сопротивление на больших глубинах и тепловую неоднородность. В центральной части рифтовой зоны благодаря сильному прогреву сиалической коры мантийным астенолитом широко присутствует гранитный магматизм и тесно ассоциирующие с ним железо-марганцевое и полиметаллическое оруденения.

Четвертый тип. Блоки древних сиалических комплексов, включенные в качестве реликтов в современные палеозойские покровно-складчатые системы, соответствующим образом переработаны в них и подстилаются литосферой палеоокеанического типа. Они представляют собой своеобразные террейны, обрамленные чужеродными структурами.

Пятый тип. Блоки земной коры и верхней мантии, отмеченные широкими градиентными зонами тепловой плотности и электрического сопротивления, располагаются на контакте древней океанической и континентальной коры и соответствуют сейсмофокальной зоне *Вада-ти-Заварицкого-Беньофа*. Данный тип блоков отмечен многочисленными траверсами, но геологическое значение их раскрыто еще относительно слабо.

Например, специфика геофизического строения полиметаллического пояса Рудного Алтая обусловлена его положением на границе литосферных плит, в борту рифтовой системы. Методы ТВТ и МТЗ позволяют рассматривать в качестве такой палеозоны полого падающий к северо-востоку Иртышский глубинный разлом [32], игравшего роль зоны *Беньофа*.

Он сопровождается внедрением линейных мантийных диапиров, миграцией к поверхности андезито-базальтовых расплавов, развитием подвиговых (*глаукофановых*) комплексов. Эта зона является рудоконтролирующей структурой, по которой мантийные рудные флюиды поставляли широкий спектр металлов в верхние горизонты коры.

Приведенная выше классификация структурных неоднородностей литосферы опирается на пока еще несколько ограниченные ТВТ и МТЗ данные, но в дальнейшем будет дополняться и совершенствоваться. Неоднородности литосферы играют важную роль в формировании металлогенической специализации. Информация ТВТ может успешно использоваться для уточнения границ тектонических и металлогенических зон, формирования глубинных моделей рудообразующих систем и конкретных месторождений, а в конечном итоге, для прогнозирования областей полезных ископаемых.

В настоящее время на практике для выделения перспективных участков в комплекс геофизических работ включают преимущественно высокоточную магнитную и радарную съемки, наземную электроразведку и геохимию. Нами же предлагается на ранней стадии поисковых работ использовать метод ТВТ. Важнейшей информацией для анализа послужат латеральные и вертикальные распределения неоднородностей коры и верхней мантии, а также картирование интенсивности отражательной способности минералов-индикаторов на земной поверхности. Спектральные свойства минералов и природных объектов в ближнем инфракрасном диапазоне различаются по коэффициенту излучения. Глины, карбонаты и сульфаты имеют отчетливые линии поглощения. Отличие спектров основных и кислых горных пород определяется присутствием кварца и слюд. Поэтому нами разработан новый подход к интерпретации спектральной информации, который сочетает глубинные и поверхностные построения моделей геологической среды на одном методологическом уровне. К важнейшим признакам, предлагаемым в качестве косвенного критерия при мелкомасштабном прогнозировании алмазоносных и золотоносных районов, относят:

Во-первых, присутствие приуроченности провинций к склонам вертикальной зоны повышенной проницаемости литосферной мантии и

каналу транспортировки неистощенного мантийного вещества к земной поверхности. Кимберлитовая магма наиболее вероятно проявится в периферии расположения вертикального мантийного проницаемой зоны. Имеет место корреляция между глубиной аномально проводящей мантии и алмазонасностью. Чем ближе к дневной поверхности располагается флюид-расплав, поставлявший в верхние этажи коры глубинные ксенолиты, кристаллы пироба, оливина, а также алмазы ранних генераций, тем более вероятным является присутствие проявлений алмазонасных формаций [86].

На интрателлурическом этапе магматической стадии, во время которой происходит движение расплава от очага зарождения к земной коре, РТ-условия отвечают области стабильного алмаза. Образование кимберлитовых магм центральных частей конвективных потоков на больших глубинах, как правило, обеспечивает высокую сохранность алмазов. В случае узких вертикальных зон кимберлитовые тела относят к слабо алмазонасным проявлениям. Степень сохранности алмазов зависит от длительности и режима плутонического этапа, протекающего в меняющихся термодинамических условиях. Тепловые каналы следует связывать с разуплотнением при разогреве вещества. В дальнейшем степень дифференциации литосферы используется для ранжирования зон по перспективам поиска.

Во-вторых, местоположение алмазонасных участков контролируется повышенным тепловым потоком, совпадающим в разрезах с аномалиями коры – сейсмическим волноводом и локальным электропроводящим слоем. В сечении он напоминает горизонтальный пласт мощностью порядка 15–20 км. К кровле и подошве слоя приурочены зоны глубинных разломов. Тектонические ослабленные зоны создают трещиноватость структуры.

В-третьих, высокая плотность земной коры коррелирует с увеличением процентного содержания SiO_2 (*сиаличность*) пород. На фоне изменения теплового поля, приводящего с глубиной к нарастанию или уменьшению плотности, в краевых частях разреза располагаются линзообразные по форме толщи. Эти геологические тела являются промежуточными магматическими очагами. Местоположение алмазонасного поля пространственно совпадает с тектоническими ослабленными зонами – над самой апикальной частью подъема корового слоя.

В-четвертых, аномальное значение ТП в коровом слое свойственно не только районам с коренной алмазоносностью, но и для участков с литофильно-халькофильным оруденением. Главные особенности моделей рудных зон двух рассматриваемых минерагенических типов состоят в следующем: инверсия параметра плотности в среднем коровом слое районов кимберлитового магматизма сопровождается локальными тепловыми источниками; рудные районы литофильно-халькофильного профиля отличаются повышением ТП в среднекоровом слое; блоки коры характеризуются высокой силичностью пород. Например, содержание SiO_2 составляет (63–70)% для литофильно-халькофильного профиля и (70–73)% для блоков с предполагаемой коренной алмазоносностью (*кимберлитового и лампроитового магматизма*) в основных рудных районах России [10].

В-пятых, проявления промежуточных очагов плавления пород в виде скрытых интрузивных тел с веерной формой каналов выхода магматических образований на дневную поверхность. В результате на RGB снимке и карте рельефа местности наблюдаем образование кольцевых и линейных шовных структур, несущих минерагеническую информативность. Вероятно, тела алмазоносных пород располагаются на обрамлении крупного купола в виде комплекса даек малых размеров.

Анализ ТВТ данных весьма перспективен в практическом аспекте и должен проводиться совместно с другими геофизическими методами.

6.2. Мелкомасштабное прогнозное исследование месторождений золото-алмазоносной провинции

Обратимся к обзору перспектив тепловизионного зондирования на примере Западно-Африканской золото-алмазоносной провинции. В этом регионе процесс тектонической и магматической активизации проявлялся в течение всей геологической истории Земли [48,62,63]. Наиболее молодыми в районе Бирримского золотоносного пояса являются герцинские изверженные породы трапповой формации (долериты, диабазы), залегающие в виде небольших штоков и даек, силлов и покровов. Это привело к внедрению многих золотоносных и алмазоносных мантийных

тел. Находки в коре выветривания «ювелирных» кристаллов на территории Республики Гвинея выдвигают ее в разряд потенциально перспективных алмазоносных регионов.

В Гвинеи найдено 17 трубок и более 50 кимберлитовых даек. Падение тел преимущественно крутое и вертикальное, мощность достигает 4–5 м. Дайки с глубиной становятся более мощными и являются, как правило, продуктом единого магматического импульса. Протяженность слепых жил варьирует от первых сотен метров до 1,2 км. Самостоятельные жилы и небольшие дайки основных пород трапповой формации возникли в процессе образования материнских кимберлитовых тел в период проявления базитового магматизма раннемезозойского возраста. Рой долеритовых даек и ряд зон ветвящихся прожилков имеют выходы на дневную поверхность, отражаясь в инфракрасном спектре аномалиями малых размеров. Некоторые тела скрыты осадочной толщей. Присутствие в аллювии пиропов алмазоносного гарцбургит-дунитового парагенезиса может говорить о близком расположении питающих россыпь кимберлитов [48].

С помощью ТВТ технологии доказана применимость дистанционного метода, основанного на аномалиях эндогенного теплового поля как косвенного критерия выявления рудных и нерудных полезных ископаемых. Использован синтезированный ночной и дневной тепловой снимок космического аппарата MODIS-Terra и Landsat. Главной задачей тепловизионной томографии является прогнозная оценка на региональном и локальном уровнях минерагенической информативности ТВТ. В процесс обследования входило не выявление отдельных россыпных и коренных месторождений золота и кимберлитовых тел, а прогнозирование по тепловым параметрам достаточно крупных зон и алмазоносных полей.

Глубинное строение и закономерности формирования алмазоносных и золотоносных формаций иллюстрируются траверсом по эталонным металлогеническим зонам срединного массива Западной Африки (рис.6.5). Геотермические профили проявления алмазов не пересекают, располагаясь от них на некотором расстоянии, что позволяет пользоваться методом интерполяции. Вдоль линии установлены многие члены магматического ряда, широкое проявление траппового вулканизма и сопря-

женного с ним глубинного магматизма. Тепловая модель литосферы указывает, что имеются условия для зарождения кимберлитовых расплавов и процесса образования алмазов. По-видимому, источником служил восстановленный углеродсодержащий мантийный флюид. Магматические очаги формировались в неистощенной мантии на сравнительно больших глубинах. По мере продвижения к северо-востоку Мали, Сенегала и части Гвинеи блок истощенной мантии резко утолщается, находясь в области регионального повышения плотности теплового потока. Граница перехода к слабому полю территориально совпала со складчатым поясом Сьерра-Леона.

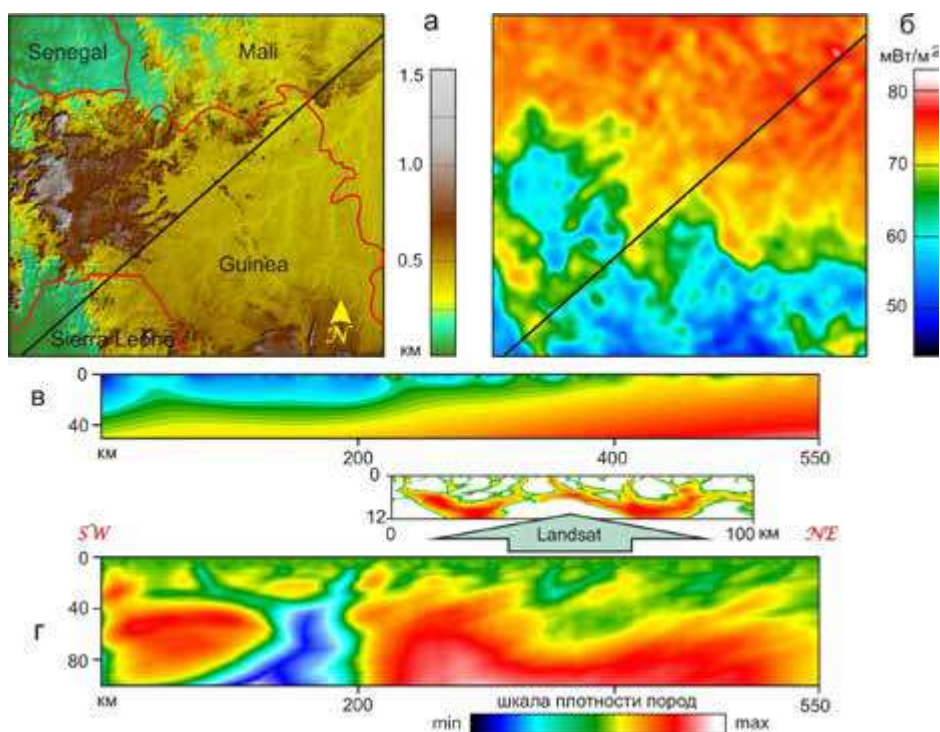


Рис. 6.5. Результаты тепловизионной томографии Западно-Африканского региона. Рельеф местности (а), карта-срез теплового потока на глубинах 20 км (б), разрезы ТП (в) и блоково-разломных структур (г) с разной степенью разрешения

Внутреннее строение коры описываемой площади имеет различия в интенсивности латеральной неоднородности среды. Местами поверхность М испытывает прогиб амплитудой 5–8 км. Пространственно эти изломы глубинных границ отвечают зонам разломов. Степень расслоения коры здесь выше. Блоки литосферной мантии соответствуют истощенному составу и не утрачивают связи с корой. В целом ЗК региона имеет мощность 36–38 км, что не отличается от алмазоносных провинций мира. Например, глубины до поверхности Мохоровичича в основных провинциях кимберлитового магматизма не превышает в Якутии 32 км, в Беломорье – 41 км. Мощность ЗК кимберлитового магматизма Северо-Американской платформы изменяется в интервале 35–45 км.

Таким образом, сходство разрезов многих месторождений и проявлений алмазов состоит в том, что на глубине располагается плотный блок литосферной мантии истощенного состава, представляющий собой линейный мантийный астенолит. Он ограничен наклонными зонами низких значений ТП, которые отвечают глубинным поясам поступления вверх неистощенного мантийного вещества, тепловых и флюидных потоков, а в земной коре – интенсивно разрушенным и переработанным этими процессами блокам континентальной коры сиалического состава. Этим поднятиям соответствует разветвляющаяся из единого вертикального ствола система структур и разломов.

Отличительной чертой ТП разреза является сжатость переходных зон литосферной мантии, вследствие чего локальный глубинный очаг в нижней части коры, возможно, сформирован слабо. Не исключено, что объемом флюидных потоков по восстающим каналам был значительно меньшим, а сам процесс прерывистым. То есть образовалась более закрытая, сдавленная глубинная подвижная зона. В результате возникает растрескивание коры слабой степени и проявляются многочисленные тектономагматические процессы.

Во многих разрезах Бирримского золотоносного пояса субстрат состоит из многоэтажных сегментов, вытянутой и/или локальной изометричной формы. Структура разреза может иметь чешуйчатый вид (рис.6.6). Интрузивная деятельность имела многофазную стадию внедрения магмы, создавая каркасно-линзовидный характер рисунка. Проявление

магматических тел на различных уровнях позволяет выделить основной (глубже 6 км), промежуточный (4,4–1,8 км) и поверхностный (выше 0,8 км) очаги. Это обуславливает закономерный вид изолиний интенсивности теплового потока в современном разрезе. Реликты тел формируют направление потока и градиентную зону в виде наклонной площадки. Выявленные черты сходства с интрузивной природой среды отнюдь не случайны и свидетельствуют об общей направленности процесса формирования структур региона.

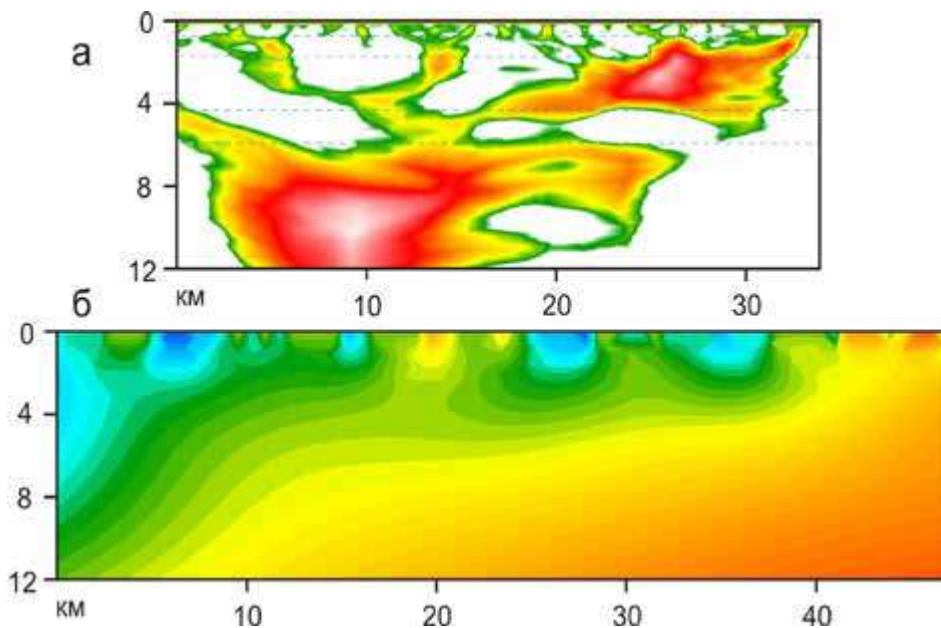


Рис. 6.6. Модель интрузивных образований (а) и глубинного теплового потока (б) на территории Республики Гвинея

С этих позиций повышается достоверность прогнозирования минерогенических экранированных аномальных зон. В современных аллювиальных россыпях большое внимание уделяется обнаружению источников золото-алмазоносной минерализации в теле фундамента.

Детальные площадные исследования кольцевой структуры. Наша цель – по тепловизионным данным создать реконструкцию современных аналогов геоблоков, разломов, складкообразования и активных конвективных гидротермальных систем. На примере рассмотрения фактического материала районирования рудообразования проиллюстрируем сводную информацию о концептуальном подходе в использовании спектрональной космической съемки. Мы полагаем, что изложенный подход поможет геологам убедиться в эффективности и целесообразности 3D-ТВТ разведки рудных и нерудных полезных ископаемых.

Закономерности размещения месторождений золота. Геологический анализ кольцевых структур демонстрирует их неизменную связь с проявлениями магматизма среднего и кислого состава [63]. Ранее установлено, что для большинства крупных рудопроявлений (месторождение Калана золото-кварцевой формации) фиксируется пространственная связь золотого оруденения с расположением малых интрузий, которые контролируются системой протерозойских разрывных нарушений северо-западного азимута простириания (310^0 – 340^0). Определяющими в размещении золотоносных узлов являются глубинные разрывы скрытого типа – внутри блоков зоны повышенной трещиноватости, места разветвлений разломов, области сопряжений и пересечений различно ориентированных разрывов [12].

Наличие длительно развивающихся региональных протяженных рудоносных поясов обуславливается внутрикоровым процессом, который приводит к дифференциации мантийного магматического расплава. Связь золотого оруденения с этим явлением опосредованная. Месторождения золота располагаются в коре не хаотично, а вполне закономерно и контролируются разрывной структурой. Устанавливаются различные виды пространственной симметрии в размещении рудопроявлений, с тенденцией развития через определенное расстояние. Зная этот шаг, можно более уверенно подходить к оценке известных и прогнозированию новых месторождений.

Для чистоты эксперимента выбран полигон с высокой степенью обнаженности (*частичным отсутствием растительного покрова*), слабой расчлененностью рельефа и речных долин, интенсивным отражением

пород. Преобразованные нами изображения построены по методу главных компонент (*Principal Components*). Математическая модель метода главных компонент (PC) базируется на логичном допущении, что значения множества взаимосвязанных признаков порождают некоторый общий результат. Схема синтеза цветов R, G и B соответствуют стандартным, общеизвестным индексам спектров 1,2 и 3. Обработка цифрового поля Landsat дополняется RGB-изображениями каналов 1, 4 и 2 с целью улучшения дешифрирования и разделения классов природных образований (*минералов*) в многомерном пространстве спектральных признаков (рис.6.7).

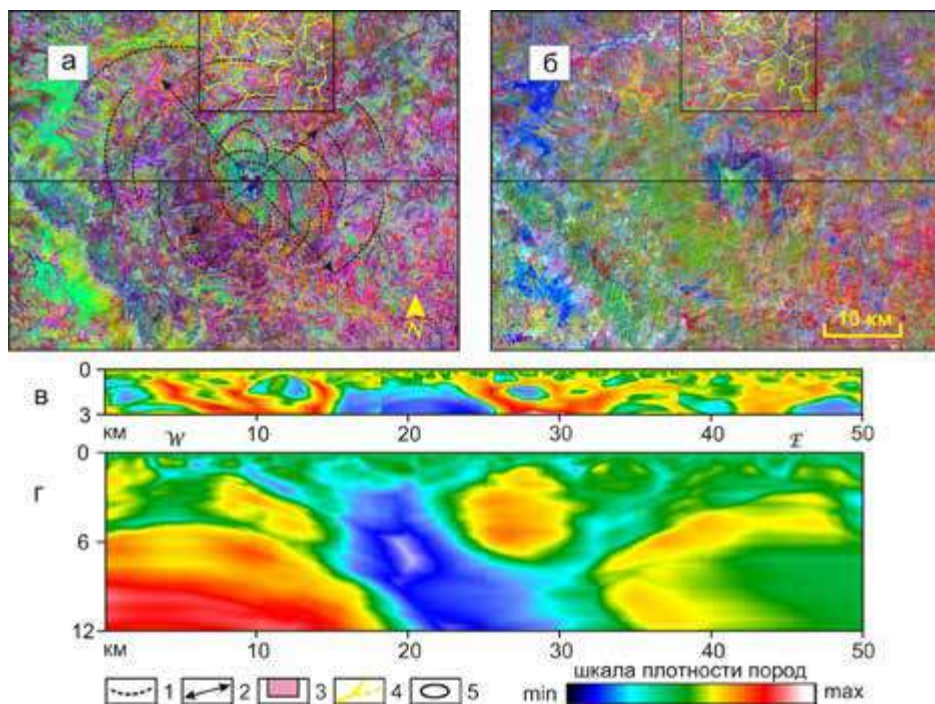


Рис. 6.7. Синтезированный RGB-снимок Landsat каналов 1,2,3 (а) и 1,4,2 (б), модель блоково-разломных структур детального (в) и регионального (г) строения. Условные обозначения: 1 – кольцевая структура; 2 – ось объекта; 3 – контур детального участка; 4 – разлом; 5 – перспективная зона рудопроявления.

Поверхностные признаки играют очень важную роль в открытии новых месторождений. В процессе исследований выявлена важная закономерность в геологическом строении. В центре площади сохранилось очертание кратера овальной формы. Большая ось эллипса вытянута до 30 км в северо-западном направлении под углом 320° , ортогональная ось простирается на 20 км. Кольцевой тип структуры меридионального направления располагается неравномерно относительно центра. Размеры внутренней зоны кратера достигает 16×9 км с отклонением оси на 10° . Небольшая сжатость структуры происходит в результате растяжения в северном направлении. Это, вероятно, обусловлено развитием интрузивных массивов в краевых частях кратера. Наиболее важным контролирующим фактором в размещении глубинных источников тепла являются дайки.

В результате систематизации композиционного распределения локальных элементов в гетерогенных зонах была получена точная картина, позволившая установить четкую связь отдельных элементов с геоморфологическим строением. Яркость цвета изображения и интенсивность отражательной способности горных пород наглядно соотносятся с длиной волны. Одной из важных особенностей отраженных и рассеянных электромагнитных волн является пренебрежимо малая роль эффектов вторичного рассеяния поля от каждого ее элемента. В результате верификации пикселей, полученных при классификации, со спектральной кривой установлено, что многие зоны с большой вероятностью принадлежат выходам интрузии на дневную поверхность. Они группируются в нескольких потенциально рудных участков (рис.6.8).

В свою очередь, отложение золотосульфидной ассоциации и сопутствующих рудогенных элементов может происходить при относительно умеренных температурах из углекислотно-водных растворов (по классификации В. Линдгрена, 1933) [121]. Возможно, что процесс кристаллизации является одной из причин отложения рудообразующих минералов во вмещающей среде за счет восходящих термальных вод, генетически связанных с интрузивным телом. Совмещение модели интрузивного тела с положением локальных тепловых источников указывает на природные закономерности структуры дайки и особенности ее реологического строения. По предварительной оценке геотермического поля, размещение в модели локальных горячих источников на глубинах 5–7 км,

повышает аномалию ТП как минимум на 20⁰ относительно нормального уровня (180–240⁰С). Следовательно, существуют все симптомы вскипания растворов и газоотделения в условии большого перепада давления, что создает предпосылки рудообразования. При этом конвективные ячейки могут дробиться, укрупняться и мигрировать под воздействием внешних процессов и внутренних неоднородностей. По-видимому, признаки полезных ископаемых и индикаторных минералов целесообразно искать в краевых зонах структуры в виде жил, штокверков и рассеянных руд, имеющих относительно высокую концентрацию.

Такое суждение вполне логично позволяет объяснить формирование модели, в которой присутствует ряд конических тел, представляющих собой самостоятельные фазы внедрения структур центрального типа. Периферические кольца отражают контур тектонического объекта, образованный наиболее древними телами. Более мелкие из них могут рассматриваться как составные элементы более крупных. Причем крупные элементы, несомненно, отражают геодинамическую сегментацию среды. Нередко между отдельными кольцевыми границами интрузии находятся барьеры из вмещающих пород. Можно предположить, что в результате трансгрессии моря и остывания магматического штока на этапе континентального развития Западно-Гвинейской синеклизы, центральная часть постепенно заполнялась осадочно-вулканогенным материалом, образуя наложенные грабены и складчатые структуры. Это сыграло большую роль в локализации очагов разгрузки рудных систем. Именно здесь надо искать причину ритмики и периодичности структур. Следует отметить, что не менее важным фактором является развитие речных систем. Долины русел водотоков представлены на RGB-снимке в виде темных изломанных линий и в ряде случаев определяют вторичное развитие сульфидных зон.

К поисковым признакам продольной и поперечной зональности золоторудной минерализации следует также отнести пересечения ортогональных разломов с изменением их простирания [12]. В ходе углубленного анализа природных систем установлено, что не все узлы сопряжений в равной мере благоприятны для локализации оруденения. Наиболее предпочтительные условия - это пересечения плохо выраженных (*скрытых*) разрывов, система мелких сближенных разломов, тонкая зона тре-

щииноватости. На места локализации оруденения оказывают влияние изгибы открытых кулисообразных разломов, где происходит их разветвление на систему более мелкого порядка. По этой причине определяющее влияние имеют слабо выраженные разломы между блоками и участки проницаемых нарушений, расположенные на некотором удалении от них. В таких зонах фильтрационный поток низкий, поэтому образуется более высокая концентрация растворов, а как следствие – локализация оруденения и сопутствующих элементов. Эффект нагнетания рудоносных растворов отмечается интенсивным теплообменом с вмещающими породами. Аналогичная закономерность устанавливается для малых тел, способствующих золотому рудоотложению на ограниченном участке.

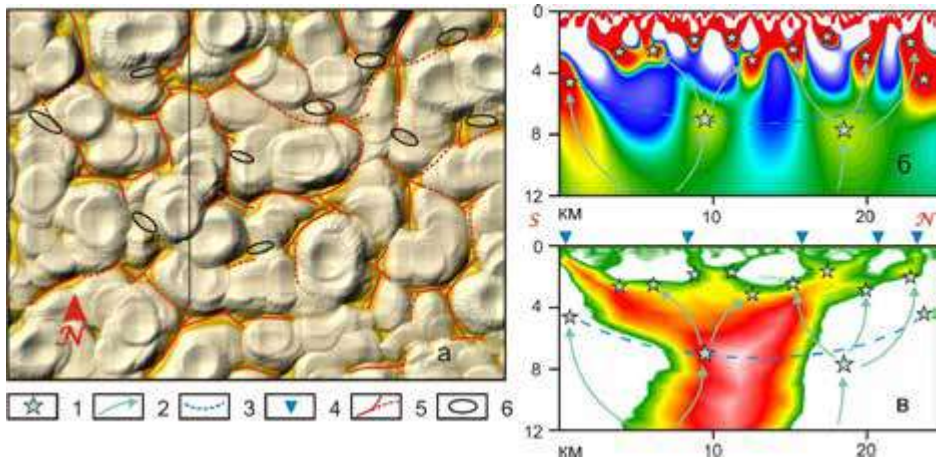


Рис. 6.8. Строение дайки в виде фрагмента горизонтального среза блоково-разломной структуры на глубине 0,5 км (а), модель тепловых источников (б), меридиональное сечение интрузии (в). Условные обозначения: 1 – локальный источник; 2 – вектор ТП; 3 – региональная тепловая граница; 4 – местоположение интрузии на поверхности; 5 – разлом и интенсивная вертикальная трещиноватость; 6 – зона рудопроявления

Другой, не менее примечательной, особенностью в формировании зон рудного ареала является складкообразование осадочных пород в виде лучевой симметрии. Складчатые формы имеют три масштаба (микро-, мезо-, мега-) [72]. Элементами триады являются блок, разлом, кливаж и складка. Например, в нашем случае проявления блоков ТП представля-

ют собой структуры разной амплитуды. Они указывают на переменность смещений в пространстве и образование складчатости чехла. Такие формы созданы в результате бокового сжатия слоев (рис.6.9). Стрелками показаны векторы различного направления смещения. Они соответствуют процессу интенсивного сдвигового течения в горизонтальном направлении.

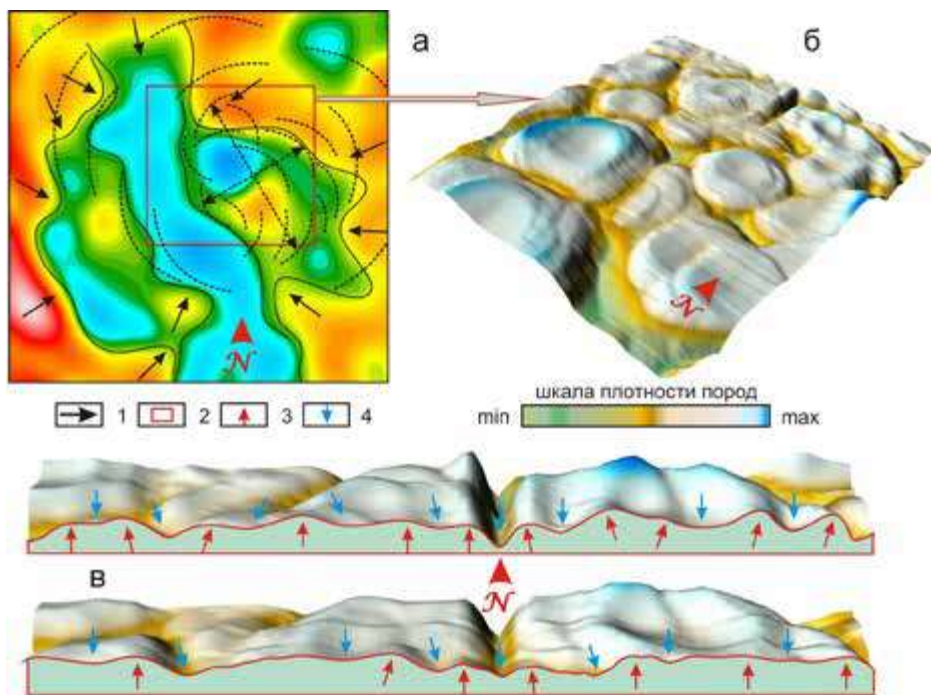


Рис. 6.9. Схема формирования мегаскладок в зоне кольцевой структуры.

Условные обозначения: срез тепловых источников на 5 км (а); зональность блоково-разломных структур на 0.65 км (б); фрагмент вида складчатости чехла на глубинах 0.4 и 0.65 км (в). 1 – вектор теплового поля; 2 – контур детального участка; предполагаемое направление формирования складок 3 – положительное и 4 – отрицательное.

Морфология образования мегаскладок в естественной среде зависит от: регионального механизма деформации; относительного вклада перемещения масштабного ранга блоков по граничным разломам; вращения блоков вследствие кривизны тектонических нарушений; сочленения

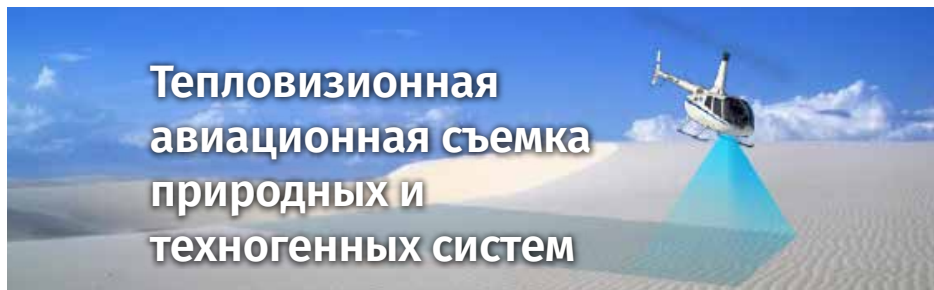
разломов и слоев (зон смятия). Следует иметь в виду, что если масштаб смещения блоков по вертикали лимитирован, то по латерали – не ограничен. Возникает дискретность, блоковая мозаичность строения и комpositность структуры.

Максимум деформирования слоистых толщ всегда соответствует шву разлома, а минимум – периферии, что обуславливает горизонтальную тектонофаціальную зональность. Выделяются три типа дислокаций по степени смятия и сплошности потока:

- слабое смятие блока (*с реликтовыми ядрами несмятых пород*),
- сильная деформация толщ (*анизотропия зоны разлома*),
- умеренная (*нейтральная*) форма складки с вращением блока (*без реликтов*).

Следовательно, проблему морфогенеза складок, в которых происходит концентрация оруденения, возможно решить путем изучения соотношения геоблоков между собой, разломов и блоков, а также степени сплошности потока, начиная от верхней мантии и коры до фундамента и осадочного чехла. Понимание механизма и причин возникновения микроскладок применительно к локальному участку не нуждается в анализе движений литосферы в целом. Достоверная информация получается путем расчета приращения срезов блоково-разломных структур для разных глубин. Повышенное содержание рудных элементов следует связывать с увеличением амплитуды складок, с ее апикальной частью.

В заключение следует отметить, что, используя значимые вертикальные и поверхностные спектральные критерии, можно создать информационную карту рудного поля. При составлении программы разведки она должна стать основой для дальнейших геофизических и литогеохимических детальных исследований.



«Когда Мы даем людям вкусить милость, они радуются ей. Когда же зло постигает их за то, что приготовили их руки, они тотчас приходят в отчаяние.» (Сура «Ар-Рум», 30:36)

وَإِذَا أَذَقْنَا النَّاسَ رَحْمَةً فَرِحُوا بِهَا
وَأَن تَصْبَهُمْ سَبِخْ بِمَا لَمَسْتَ
أَلَيْسَ إِذْ هُمْ يُفَنِّطُونَ

7.1. Авиационный тепловизионный комплекс

Для решения геологоразведочных, экологических и техногенных задач предлагается использовать метод дистанционного (авиационного) изучения строения геологической среды, основанный на технологии многоуровневого зондирования Земли в тепловом ИК диапазоне [36]. Тепловизионные исследования выполняются путем космического и авиационного наблюдений. Космическая съемка предназначена для регионального, мелкомасштабного геофизического картирования района. Авиационная съемка (*вертолеты, дирижабли*) – для крупномасштабных детальных исследований геологического строения и техногенных систем.

Космическая съемка не позволяет получить информацию об особенностях строения верхней части осадочного чехла и состоянии техногенных объектов, расположенных на небольшой глубине. Поэтому требуется комплексный подход в развитии технологии ДТЗ на базе малой авиации с минимальным набором аппаратуры в виде тепловизора, бортовой цифровой видеокамеры, системы глобального спутникового позиционирования и создания методики дешифрирования снимков, основанной на расчетах параметров теплового поля.

В качестве основного средства аэросъемки нами выбран дирижабль. Его неоспоримым преимуществом является высокая безопасность вы-

полнения полетов по сравнению с другими летательными аппаратами. Даже в случае отказа двигателя или прорыва оболочки баллона дирижабль способен медленно дрейфовать до места приземления. Экологическое воздействие этих аппаратов на окружающую среду минимальное. Дирижабли отличаются малым расходом топлива (*до 10 раз меньше, чем у вертолета*). Особенности конструкции и управления этим видом летательных аппаратов делают возможным рациональный выбор диапазона высот и скоростей как при обследовании сверхмалых объектов (*провода линий электропередач, дефекты технологического оборудования, врезки в нефтепроводы*), так и для площадных съемок больших территорий. Все эти качества делают дирижабль идеальным носителем для целей авиационного тепловизионного зондирования Земли.

При определении класса и модели дирижабля учитывалось, что создаваемый комплекс воздушной съемки должен быть недорогим, мобильным и несложным в пилотировании. Такими свойствами обладает тепловой дирижабль AS 105GD производства компании GEFA-FLUG GmbH (ФРГ), отличающийся простотой и низкой стоимостью эксплуатации, технического обслуживания и хранения. Оболочка такого летательного аппарата заполняется нагретым воздухом. По сравнению с газовыми дирижаблями это дает существенную экономию, так как подъемный газ (гелий) является весьма дорогим. Кроме того, тепловому дирижаблю не нужны эллинги и причальные мачты, а перевозиться он может в собранном виде на обычном грузовом автотранспорте. Недостатками является низкая подъемная способность горячего воздуха (*30% от гелия*) и плохая управляемость в ветреную погоду.

При выборе тепловизора определяющими факторами были высокие рабочие характеристики аппаратуры, удобство в эксплуатации и невысокая стоимость. Этим требованиям удовлетворяет портативная камера NEC серии R500 AVIO производства компании NEC San-ei Instruments, Ltd (Япония). В качестве детектора используется уникальная лицензионная микроболометрическая матрица шестого поколения корпорации Boeing (США) размером 640×480 пикселей. Эта матрица имеет отличные измерительные свойства. Общее число пикселей равно 307200. При этом размер получаемого изображения в 4 раза превышает стандартный размер кадра ранее выпускавшихся детекторов. Важнейшим преимуществом лицензи-

онной матрицы является высокое качество исполнения. Как следствие, низкие тепловые шумы и отсутствие «битых» пикселей. Мгновенное поле зрения тепловизора – 0.58 мрад, что является наилучшим показателем по сравнению с аналогичными моделями других производителей. Минимально различаемая разность температур прибора составляет 0,03 °C (при температуре 30 °C). Точность измерений $\pm 1\%$. Таким образом, тепловизор серии R500 AVIO (NEC) – это современный высокочувствительный прибор, позволяющий выполнять измерения с высоким разрешением.

Для получения изображений земной поверхности в видимом диапазоне оптического спектра с целью привязки к местности результатов тепловизионных измерений необходимо осуществлять синхронную фотосъемку. Цифровая зеркальная фотокамера CANON EOS 350D производства компании CANON Inc (Япония) обеспечивает съемку. Она имеет 8 млн пикселей и оснащена объективом с постоянным фокусным расстоянием 50 мм. Пространственное разрешение составляет 0.21 мрад, что соответствует 2 см с высоты 100 м.

В процессе работы впервые создан и испытан в полевых условиях дирижабельный тепловизионный комплекс высокого разрешения (ДТК-ВР), предназначенный для авиационной ИК диагностики природных и техногенных объектов, залегающих на небольшой глубине. В состав ДТК-ВР входят тепловой дирижабль GEFA-FLUG AS 105GD, высокочувствительный тепловизор NEC R500 AVIO, цифровая фотокамера CANON EOS 350D, система спутниковой навигации Garmin GPSMAP 496, бортовой вычислительный комплекс для управления и накопления информации. Основные рабочие характеристики авиационного носителя дирижабля: максимальная скорость полета – 40 км/ч, высота – до 2000 м, дальность – 100 км, продолжительность работы – до 3 ч, грузоподъемность – 900 кг, рациональная себестоимость летного часа в 3–5 раз меньше, чем у вертолета. Комплекс тепловизионной съемки является мобильным и при необходимости легко устанавливается на вертолет (рис.7.1). В этом случае увеличивается глубина исследования.

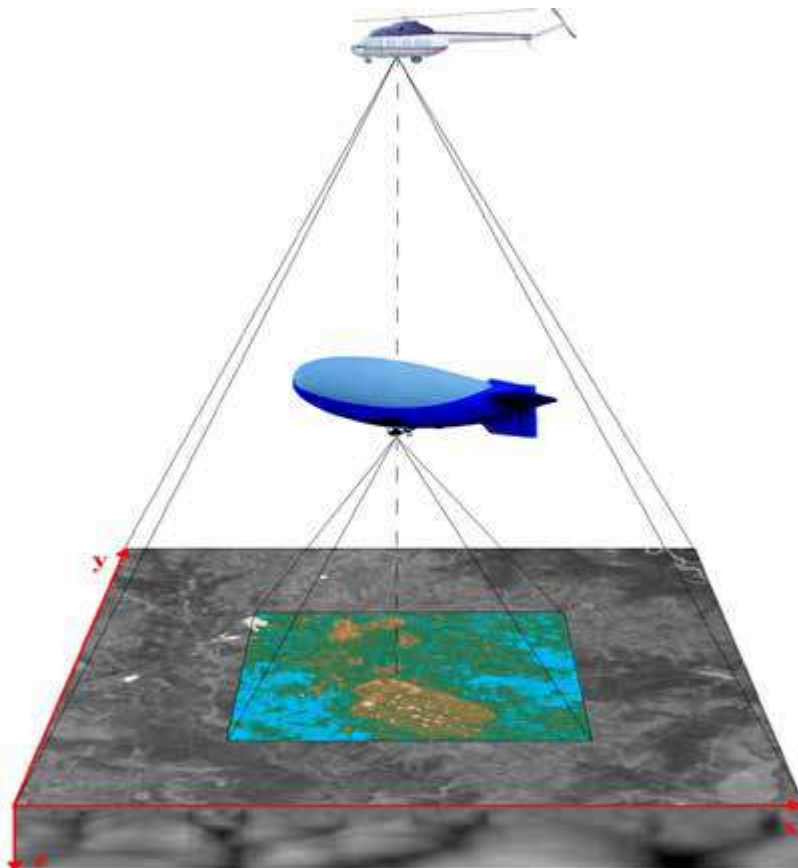


Рис. 7.1. Схема авиационной тепловизионной съемки

Основные параметры многоуровневой тепловизионной съемки приведены в таблице 5. В качестве исходных данных авиационного уровня исследований использованы характеристики тепловизора NEC R500 AVIO. Глубина расположения слоев объемной модели среды рассчитывается в зависимости от разрешающей способности тепловизионной системы и высоты полета. Выбранный масштаб и точность видеотепловизионной съемки позволяют с помощью получаемой информации обнаруживать, идентифицировать и оценивать состояние большинства техногенных объектов и окружающей их среды.

Параметры съемки на основе дирижабля (Д) и вертолета (В)**Таблица 5**

		Авиационные носители						
		Д	Д	Д	Д+В	Д+В	В	В
Высота полета, км		0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3
Размер кадра, м		19 ×14	38 ×29	76 ×58	190 ×145	380 ×290	760 ×580	1140 ×870
Масштаб съемки		1:50	1:100	1:200	1:500	1:1000	1:2000	1:3000
Глубина зондирования по слоям, м	1	0,03	0,06	0,12	0,3	0,6	1,2	1,8
	3	0,09	0,18	0,36	0,9	1,8	3,6	5,4
	5	0,15	0,3	0,6	1,5	3,0	6,0	9,0
	10	0,3	0,6	1,2	3,0	6,0	12,0	18,0
	100	3	6	12	30	60	120	180

По результатам многочисленных экспериментальных работ в различных регионах России (*городах Санкт-Петербург, Ульяновск, Туапсе; республиках Дагестан и Татарстан*) разработан технический регламент авиационной съемки. Использование апробированной методики открывает большие возможности для эффективного изучения состояния нефтепроводов, загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами на суше и море, экологического состояния труднодоступных регионов. Автоматизированная система сбора и анализа первичной информации в военной сфере деятельности предусматривает использование летающего дрона или автожира (гирокоптер) [37].

7.2. Технический регламент авиационной съемки

При реализации технологии дистанционного зондирования Земли с помощью авиационных средств необходимо выполнение ряда условий. Они определяются физико-техническими особенностями тепловизионной съемки и режимом полета воздушного носителя. Для проведения тепловой ИК диагностики природных и техногенных объектов разработан технический регламент съемки, включающий в себя набор оптимальных требований к полетным и погодно-временным условиям авиационных работ с применением ДТК-ВР. Параметры съемки, включающие в себя высоту и скорость полета носителя, интервал времени между кадрами, величину продольного перекрытия снимков. Это снижает «смаз» изо-

бражения и повышает разрешающую способность многоуровневой тепловизионной съемки дирижабельным комплексом, в котором размер пикселя составляет 3–6 см при высоте полета 50–100 м.

Полетные условия включают высоту H , скорость V полета авиационного носителя и вид съемки. Эти параметры определяются техническими характеристиками съемочной аппаратуры и возможностями летательного аппарата. Выбор высоты полета для наземных объектов проводится, прежде всего, в зависимости от их геометрических размеров. Для подземных объектов необходимо учитывать глубину их расположения в геологической среде. По масштабности исследований различаются следующие виды задач:

- диагностика технического состояния линий электропередач, автомобильных и железных дорог, трубопроводов, выявление утечек природного газа и нефтепродуктов (масштаб 1:50 – 1:100);
- обнаружение участков обводнения инженерных сооружений, установление мест активизации эрозионных и оползневых процессов, карстовых пещер, выявление мест экологического загрязнения водных объектов (масштаб 1:300 – 1:500);
- картирование геодинамических активных и разломных зон, поиск и разведка рудных полезных ископаемых, контроль пожарной опасности (масштаб 1:1000 – 1:3000).

Исходя из предполагаемой глубины исследуемого объекта (*труба, карст, разлом*), определяется масштаб авиационной съемки и высота полета H .

Ограничения на скорость и высоту накладывают летно-технические характеристики авиационных носителей и условия безопасности полета. Кроме того, необходимо учитывать максимально возможную скорость регистрации тепловизионных кадров и неизбежность значительного «смаза» изображения при повышенных отношениях V/H .

Вид съемки (*точечная, линейная или площадная*) зависит от пространственных характеристик объекта измерения. Так, например, линейной съемкой является диагностика нефтепроводов и газопроводов, а площадной – исследование лесных массивов. Отклонение фактической линии пути летательного аппарата от заданной трассы маршрута при съемке протяженных объектов – не более $H/20$.

Тепловизор NEC R500 AVIO осуществляет съемку подстилающей поверхности в покадровом режиме. При этом должен исключаться пропуск информации между соседними снимками, даже в случае вынужденных отклонений V и H от заданных величин. Минимально допустимое продольное перекрытие между соседними кадрами – 40%, поперечное перекрытие (между соседними маршрутами) – 30%. Количество полетных маршрутов при выполнении площадной съемки рассчитывается с учетом ширины полосы обзора и величины поперечного перекрытия. Ширина полосы обзора на местности L_y определяется выбранной высотой полета $L_y = kH$, где k – постоянный коэффициент, зависящий от ориентации тепловизора вдоль направления полета и принимающий значение 0,32 или 0,24.

Сформулируем условия оптимального выбора скорости полета V и частоты регистрации кадров $1/t$ при авиационной съемке тепловизором NEC TN9260: сохранение четкости изображений $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ (C – «смаз» изображения на поверхности Земли за счет движения авиационного носителя) и обеспечение, продольного перекрытия соседних кадров $P_{x\min} \leq P_x \leq P_{x\max}$

Смаз изображения определяется расстоянием, на которое перемещается съемочная система за время формирования кадра, и вычисляется по следующей формуле $C = V \delta / \Delta$, где δ – температурная постоянная времени тепловизора; Δ – размер элементарного пикселя на местности (наименьшего объекта, различимого на изображении). На практике рекомендуется допустимые значения «смаза» изображения выбирать в интервале от 1 до 2.

Зависимость линейного разрешения на местности от высоты съемки H описывается выражением $\Delta = \delta H$, где δ – мгновенное поле обзора тепловизора (угловое разрешение).

Расстояние l_p , на которое перемещается воздушный носитель за время между двумя соседними кадрами, связано с величиной продольного перекрытия и описывается следующей формулой $l_t = V_t = (1 - P_x)L_x$, где t – интервал времени между кадрами; L_x – размер на местности стороны кадра вдоль направления полета; $L_x = n_x \Delta$, где n_x – число элементов стороны матрицы, ориентированной вдоль направления полета.

Рекомендуемый диапазон параметров авиационной съемки для многообразных носителей, исходя из вышеприведенных формул, выражается следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} (1 - P_{x \min}) n_x \delta \left(\frac{V}{H} \right)^{-1} \geq t \geq (1 - P_{x \max}) n_x \delta \left(\frac{V}{H} \right)^{-1}, \\ \frac{\delta C_{\min}}{\tau} \leq \frac{V}{H} \leq \frac{\delta C_{\max}}{\tau}. \end{cases}$$

Параметры авиационной съемки для разных вариантов установки тепловизионной аппаратуры рассчитываются с помощью специальных созданных номограмм, представляющих собой графическое решение системы неравенств.

Выбор погодно-временных условий. При проведении авиационной тепловизионной съемки на точность дистанционных измерений и качество диагностики оказывает влияние целый ряд внешних факторов: температура и влажность окружающего воздуха, облачность, положение Солнца над горизонтом, скорость ветра, атмосферные осадки, состояние и увлажненность почвы, растительный покров [3,66]. Внешние условия аэросъемочных работ можно разделить на следующие группы: сезонные, временные и метеорологические.

Пространственное распределение тепловых контрастов исследуемой территории является очень динамичным вследствие высокой чувствительности к временным и погодным факторам. Радиационные температуры природных и техногенных образований изменяются в течение дня с различной скоростью (рис.7.2), определяемой их внутренними тепловыми свойствами [105]. Наибольшая скорость нагревания и остывания наблюдается у объектов с минимальной тепловой инерцией. Эффективное дешифрирование тепловых аномалий может быть достигнуто при наличии максимальной разницы радиационных температур изучаемого объекта и фона. Следовательно, для конкретной задачи необходимо оптимальным образом выбирать сезон съемки, время дня и погодные условия. При периодически повторяемых измерениях одного и того же объекта определяется интервал съемки.

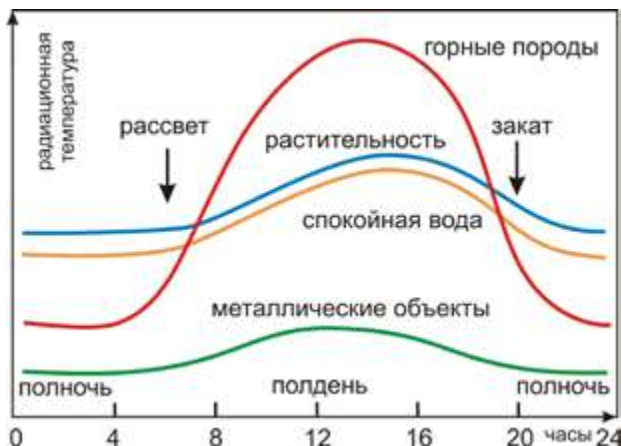


Рис. 7.2. Суточный ход радиационной температуры различных типов земной поверхности [136]

Предварительная обработка авиационных тепловизионных изображений. Она включает ряд типовых и специально разработанных процедур (рис.7.3).

Разбиение набора тепловых кадров (термограмм) на отдельные маршруты: анализ диапазона распределения значений интенсивности ТП для кадров в пределах одного маршрута; пакетное конвертирование выделенных блоков термограмм из внутреннего формата тепловизора в стандартные графические растровые файлы; составление шивок из тепловизионных изображений в специализированных программах; обратное RGB-конвертирование промежуточных цветных изображений с сохранением исходного динамического диапазона данных.

После процедуры получения стандартных растровых файлов следует географическая привязка тепловизионных изображений с использованием опорных точек на местности, топографических карт и космических снимков высокого разрешения. Для территорий с большим перепадом высот вводятся поправки на рельеф местности. Далее проводится устранение помех и подавление шумов, а по окончании – отбраковка фрагментов, полученных из одиночных снимков или шивки изображений.

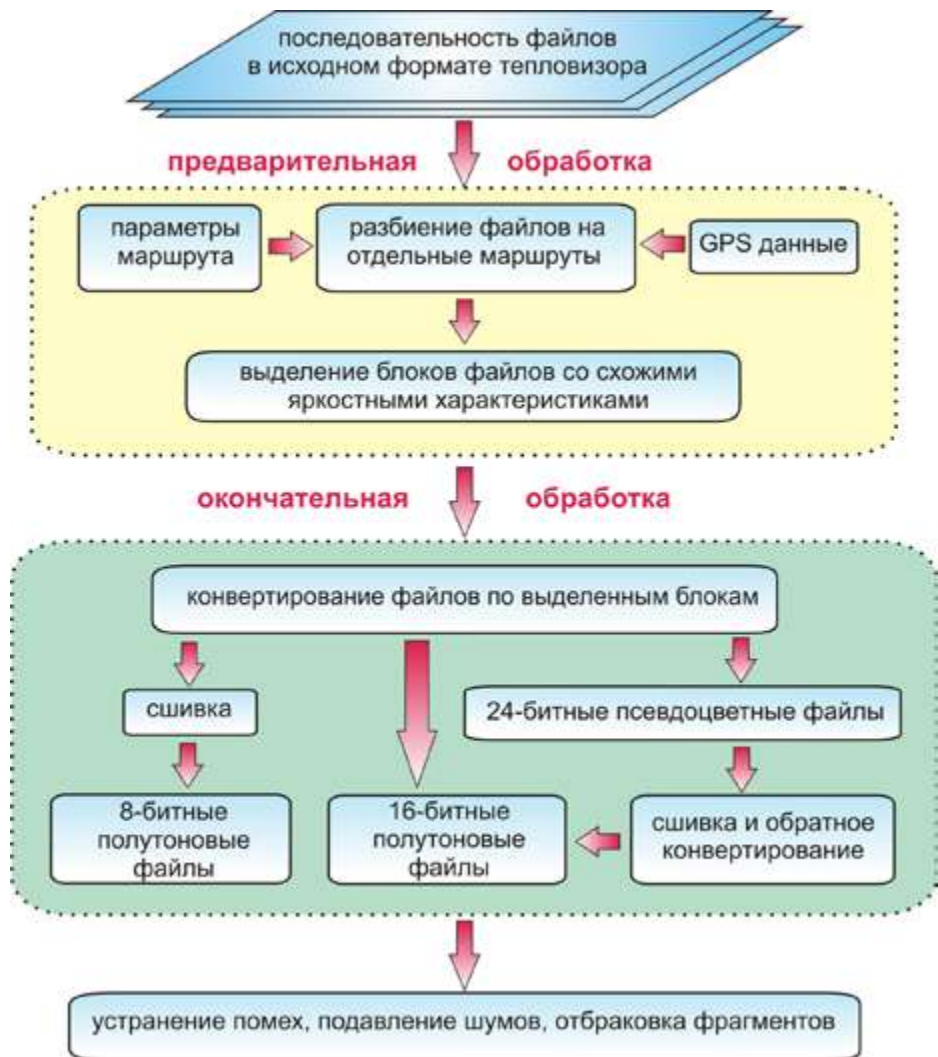


Рис. 7.3. Типовой граф обработки авиационных тепловизионных снимков

Сформулируем требования к условиям выполнения аэросъемочных работ для решения ряда практических задач.

7.3. Диагностика среды и состояние нефтепровода

Наилучшие результаты при тепловизионном обследовании подземных нефтепроводов и газопроводов достигаются в ночное время, когда величина тепловых неоднородностей земной поверхности минимальная (*наиболее благоприятная фоновая обстановка*). В случае сложности обеспечения ночных полетов рекомендуется проводить съемку ранним утром, когда температурные помехи за счет солнечного нагрева невелики, и сохраняется значительный тепловой контраст между холодной почвой и трубопроводом.

Самое оптимальное время тепловых съемок – осень, начало заморозков. В этот период отсутствует экранирующее влияние растительного покрова, и тепловые контрасты объекта и фона зависят от Солнца незначительно. При выборе времени съемок дополнительно учитывают местные географические и природно-климатические особенности территории исследования.

Метеорологические условия проведения тепловизионных съемок определяются температурой воздуха, наличием осадков, ветра и облачности [3]. При низких температурах окружающего воздуха контрастность изображения трубопровода относительно грунта будет максимальной. Для исключения избыточной влажности поверхности рекомендуется дожидаться наступления сухой погоды (*2 – 3 дня после дождя*). Не следует выполнять исследования во время выпадения осадков в виде дождя и снега, при которых резко ослабляется эффективный контраст наземных объектов. Ветер значительно увеличивает теплоотдачу земной поверхности и приводит к существенному выравниванию температур на местности. Поэтому нецелесообразно проводить аэросъемочные работы при сильном ветре (*более 5–8 м/с*). В пасмурную погоду за счет отсутствия тепловых теней от деревьев и кустарников уменьшаются тепловые неоднородности фона. Кроме того, отсутствуют аномальные температурные контрасты, вызванные прямым солнечным излучением, что отвечает требованиям, предъявляемым при тематической обработке тепловизионных снимков. Таким образом, наиболее благоприятные метеоусловия – прохладная сухая погода, сплошная

облачность и минимальная скорость ветра. Приведенные рекомендации по выбору погодных условий справедливы также для авиационной съемки тепловых сетей.

Численное моделирование теплового поля от нефтепровода. При протекании по подземному трубопроводу нефти заданной температуры T_0 создается тепловой контраст с геологической средой, в которой этот трубопровод расположен. В этом случае на земной поверхности образуется тепловая аномалия, величина которой зависит от температуры нефти, диаметра трубы, глубины залегания, состояния изоляционного покрытия, свойства грунта и погодных условий. Для оценки влияния нефтепровода и термодинамических характеристик среды на формирование теплового поля в геологической среде проведены расчеты для цилиндрического источника тепла, погруженного в однородное полупространство (рис.7.4).

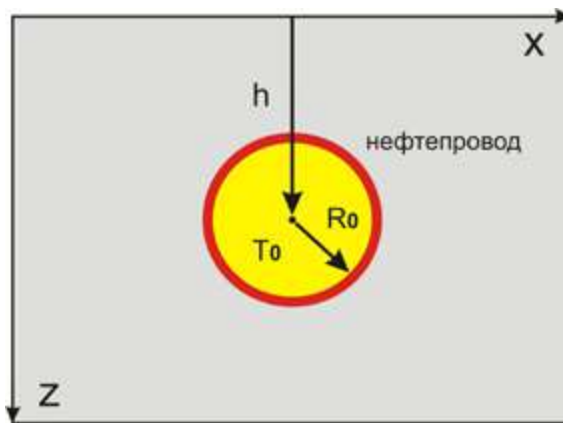


Рис. 7.4. Схема расположения нефтепровода в среде

Температурное поле для стационарного случая среды может быть получено способом отражений с использованием метода дополнительной стенки [51,55,106], которое определяется выражением:

$$T = T_w + (T_0 - T_a) \left(1 - \frac{1}{Bi\sqrt{1+X^2} \ln \frac{2h}{R_0} \left(1 + \frac{1}{Bi} \right)} \right) \frac{\ln \frac{X^2 + (1+Z)^2}{X^2 + (1-Z)^2}}{2 \ln \left(\frac{2h}{R_0} \left(1 + \frac{1}{Bi} \right) \right)},$$

где $X = x/h$; $Z = z/h$; x и z – координаты, перпендикулярные оси нефтепровода; h – глубина залегания нефтепровода; R_0 – радиус нефтепровода; T_w – температура на поверхности Земли; T_0 – температура нефти в нефтепроводе; T_a – температура атмосферы; $Bi = ah/\lambda_g$ – критерий Био-Савара; α – коэффициент теплоотдачи на границе «земля-атмосфера»; λ_g – коэффициент теплопроводности грунта.

Температура на поверхности Земли зависит от координаты X и находится из уравнения:

$$T_w = T_a + (T_0 - T_a) \frac{1}{Bi\sqrt{1 + X^2} \ln\left(\frac{2h}{R_0}\left(1 + \frac{1}{Bi}\right)\right)}$$

С учетом геометрических параметров исследуемого нефтепровода ($R_0 = 360$ мм; $h = 1.5 - 3.0$ м; $T_0 = 20$ °С) и особенностей строения вмещающей среды в виде сухого песка ($\lambda_g = 0.3$ Вт/м·К), глины ($\lambda_g = 0.9$ Вт/м·К), почвы ($\lambda_g = 1.5$ Вт/м·К), при средней температуре атмосферы $T_a = 10$ °С и коэффициенте теплоотдачи $a = 7$ Вт/м²·К проведен расчет аномальных эффектов от объекта.

Объемная модель распределения теплового поля в среде и графики приращения температур $\Delta T = T - T_a$, вызываемые тепловым полем нефтепровода, расположенного на глубине 1.5 м показаны на рис.7.5.

В результате расчетов установлено, что тепловые эффекты от объекта на дневной поверхности могут проявляться в зависимости от глубины залегания как слабыми, так и интенсивными аномалиями. Кривые симметричны по форме относительно оси трубопровода, что значительно облегчает на практике определение местоположения его на дневной поверхности Земли. В случае появления малой интенсивности аномалий в процессе визуального дешифрирования снимков возникают затруднения.

Поэтому на практике нами использован новый методологический подход для определения пространственного положения трубопровода, обнаружения утечек нефти в результате небольших трещин, нарушения изоляции труб, приводящих к изменению теплового режима, который заключается в построении объемной модели теплового поля. Мо-

дель распределения интегральной плотности теплового потока через изучаемый объект представляет широкую положительную аномалию, отражающую суммарный эффект от вмещающей среды. Дифференциальная характеристика теплового потока, представленная первой или второй производными поля, как правило, показывает кольцевую или вытянутую аномалию (замкнутую в поперечном сечении) несколько больших размеров, чем диаметр трубы. Гипоцентр его следует выбирать по минимальной интенсивности потока. Непосредственно перед заглубленной частью объекта образуются малоразмерные концентрические аномалии разного знака, создающие мозаичное их распределение в разрезе, отличаясь от смежных участков профиля. Таким образом, совокупность признаков изменения поля в разрезе позволяет с большой достоверностью устанавливать местоположение линии трубопровода.

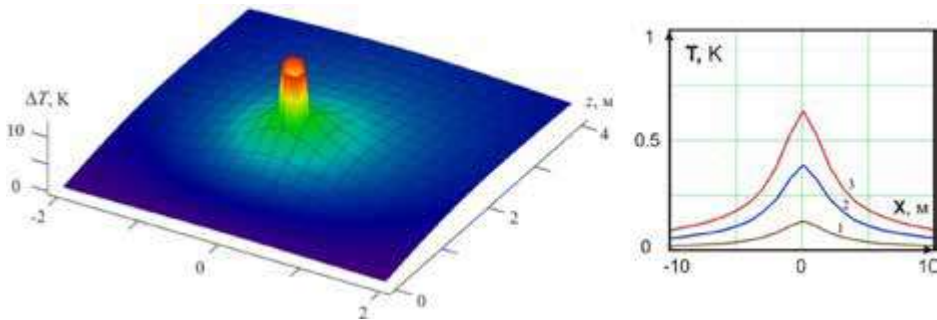


Рис. 7.5. Характеристика распределения температуры от трубопровода в грунте для сухого песка (1), глины (2), почвы (3)

Влияние условий осадочного чехла на нефтепровод. Приведем морфологическую классификацию геологической среды в зависимости от расположения трубопровода: в зоне разуплотнения и зоне уплотнения пород осадочного чехла (рис.7.6).

Зона уплотнения среды в виде сдвига пород происходит равномерно по отношению к объекту. До определенного момента рассматриваемая ситуация является менее опасной в отношении экологического риска. В зоне раздвига происходит разуплотнение среды, ослабление прочности грунта, образование провалов и обводнений и, как следствие, проседа-

ние трубопровода. В этих условиях существует большая вероятность нарушения прочностных свойств объекта.

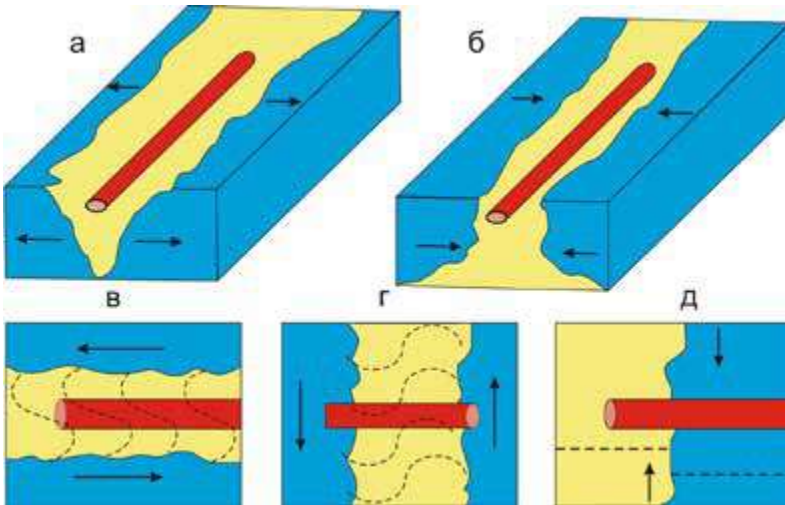


Рис. 7.6. Участок трубы в зоне растяжения (а) и сжатия (б) блоков, пликативного (в, г) и дизъюнктивного (д) нарушения среды с образованием надвига

Уменьшение глубины залегания (*всплытие*) трубы вызывает вытянутую тепловую аномалию положительного контраста. На тепловом снимке она имеет вид светлого пятна, протяженностью десятки и сотни метров. Величина контраста составляет несколько градусов. Аномалия локализована вдоль трубы и привязывается к ориентирам на местности – вантузам, просекам.

Геодинамические активные зоны эндогенного теплового воздействия проявляются в физико-химическом изменении среды в местах размещения трубопровода. Конвективный перенос тепла в этих условиях происходит за счет перетоков флюидов в верхнюю часть разреза. Вертикальная миграция по системе трещин создает неблагоприятные участки, в которых значительно повышается тепловой поток вмещающей среды. Между тем плотные, непроницаемые разности вмещающих пород ограничивают физическое воздействие на объект и выглядят в модели относительно холодной зоной.

Геотехногенные характеристики трубопровода в зоне развития тектонического нарушения обусловлены движением крыльев складок не только относительно друг друга, но и в заданной плоскости. В зависимости от положения относительно трубы выделяют продольные, поперечные и секущие разломы при согласном и несогласном залеганиях. Именно в зоне вязкого сдвигового течения неизбежно повышение напряженно-деформированного состояния труб, существенно увеличивается вероятность аварий в результате усталостных явлений в металле.

Надвиг в зоне трубопровода формирует разрывное нарушение обычно с пологим наклоном сместителя, по которому всячий блок поднят относительно лежачего и надвинут на него. Надвиگی обычно развиваются при интенсивном сжатии с пластичным перераспределением материала и образованием складок, которые воздействуют на трубы. Частным случаем является тектонический разрыв в виде подвига – активного движения лежачего крыла под висячее крыло.

Вертикальное дизъюнктивное нарушение в зоне трубопровода проявляется разрывом пластов геологической среды, сопровождаемое проникновением до поверхности Земли, и линейной деформацией объекта. Чем больше вертикальная амплитуда смещения крыльев, тем менее благоприятны условия расположения трубопровода и больше вероятность экологического риска при его эксплуатации.

7.4. Исследование экологического состояния природной среды вблизи магистрального нефтепровода «Грозный – Баку»

Тепловизионная съемка проведена на отрезке ПК 259-315 км нефтепровода «Грозный-Баку». Участки трассы нефтепровода характеризуются большой протяженностью, вдоль которых создаются условия для возникновения техногенных ситуаций, вызванных обводнением, изменением глубины залегания труб, геодинамическими активными зонами осадочного чехла.

Установлено, что при прокладке и в ходе эксплуатации нефтепроводов возникают нарушения однородности среды (*почвы*). В случае не-

нормативной нагрузки трубопровода, обусловленной такими внешними влияниями, как температурные перепады (в зоне вечной мерзлоты), выпучивание и сдвиги грунтов, размыв траншеи, продольный и поперечный изгиб трубы, могут возникать нарушения его однородности. В районах переходов магистральных линий через водные, шоссейные и железнодорожные преграды интенсивность дополнительных напряжений гораздо выше, чем на линейных участках, что является одной из причин снижения работоспособности нефтепроводов. Разрушения труб сопровождаются большим выходом нефти (рис.7.7), что приводит к локальному изменению окружающей среды в виде аномального потока тепловой энергии.



Рис. 7.7. Авиационный фотоснимок с высоты 1 км разлива нефти в акватории

Утечка нефти из трубопровода. Неоднородный характер теплофизических свойств геологического разреза, трубы, нефти и воды приводит к возникновению контрастных температурных аномалий. Например, нефтяные пятна отражают тепловое излучение и создают концентрические структуры поля, близость воды и обводнения трубопровода приводят к отрицательным значениям температур. На тепловом изображении аномалия обычно имеет вид светлого пятна округлой формы, размером в

единицы и десятки метров в зависимости от величины утечки и характера рельефа местности. Локальная тепловая аномалия положительного контраста локализована вблизи места повреждения трубопровода. Величина контраста составляет $0.5-10^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа грунта и погодных условий. При некоторых условиях, когда нефть из места утечки распространяется вдоль повреждения изоляции, ориентированного вдоль трубы, локализованная аномалия может располагаться вдоль нее (рис.7.8). Области поверхностного накопления нефти (разливы) отображаются теплыми аномальными участками, приобретая неправильные формы и охватывая значительную площадь. При пересчете поля на глубину имеет место затухание тепловой аномалии.

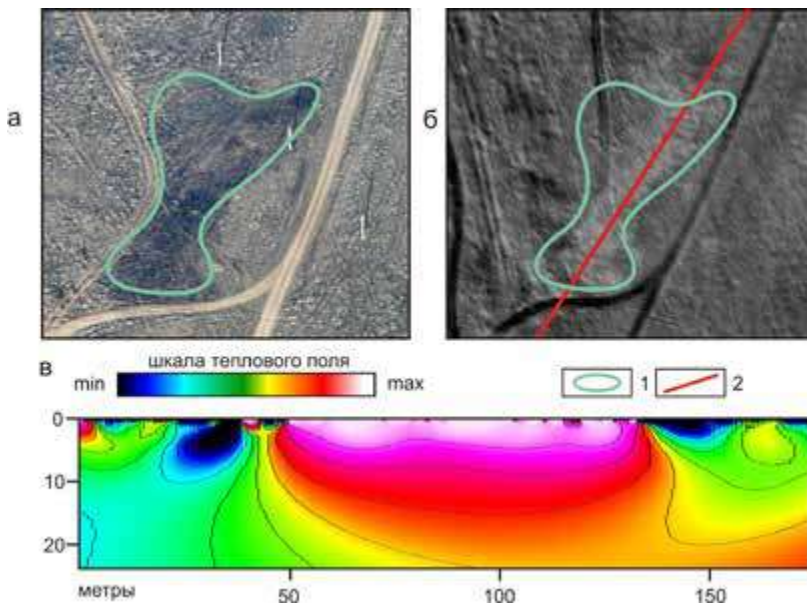


Рис. 7.8. Остаточное проявление разлива нефти на фотоснимке (а) и ИК изображении (б), модель теплового поля (в). Условные обозначения: 1 – локальные зоны обводнения, 2 – местоположение профиля

Обводнение трубопровода. Локальная тепловая аномалия различного контраста на тепловом изображении имеет вид округлого или вытянутого пятна. Аномалия обусловлена изменением тепловых характеристик

среды на участках обводнения и зависит от времени года и суток, погодных условий и солнечного нагрева. При съемках в дневное и вечернее время – темное пятно, в ночное и утреннее время (*после тепловой инверсии*) – светлое пятно. Величина контраста достигает 15–20 °С в дневное время при солнечной погоде. Области обводнения верхней части чехла проявляются в тепловом поле холодными участками, приобретая различную форму в плане (рис.7.9).

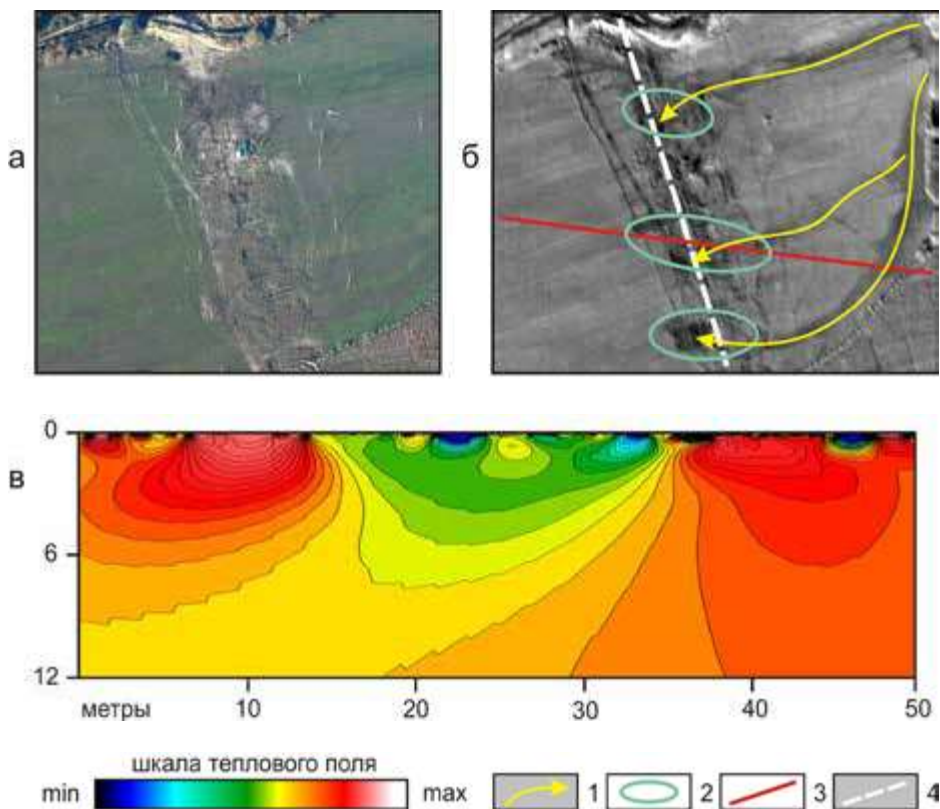


Рис. 7.9. Фрагмент проявления зоны обводнения нефтепровода на фотоснимке (а) и в ИК изображении (б), модель теплового поля (в).

Условные обозначения: 1 – пути миграции подземных вод,
 2 – локальные зоны обводнения, 3 – профиль,
 4 – местоположение магистрального нефтепровода

Нарушение изоляции и проявление врезок. Повреждение изоляции трубопровода приводит к образованию локальной тепловой аномалии положительного контраста. На тепловом снимке она имеет вид светлого округлого пятна, локализованного вдоль трубы в зависимости от величины поврежденного участка. Величина контраста составляет 0.5–3°C.

Разработан способ выявления врезок в трубопровод на основе анализа объемной термодинамической модели по изменению характера теплового излучения и проявлению аномальных разрывов среды на срезах блоково-разломных структур. Проведенные испытания позволили установить ряд признаков проявления врезок в нефтепровод: сильные или слабые повреждения грунта на видимом снимке; концентрическая тепловая аномалия над трубопроводом; линейная тепловая аномалия, проходящая под углом к трубопроводу; изменение характера теплового излучения в объемной термодинамической модели на глубинах порядка 0.5–1.5 м; проявление аномальных разрывов среды на схеме блоково-разрывных структур объемной термодинамической модели на глубинах 0.5–1.5 м. Области обводнения верхней части осадочного чехла проявляются в тепловом поле холодными участками, приобретая различную форму в плане (рис.7.10).

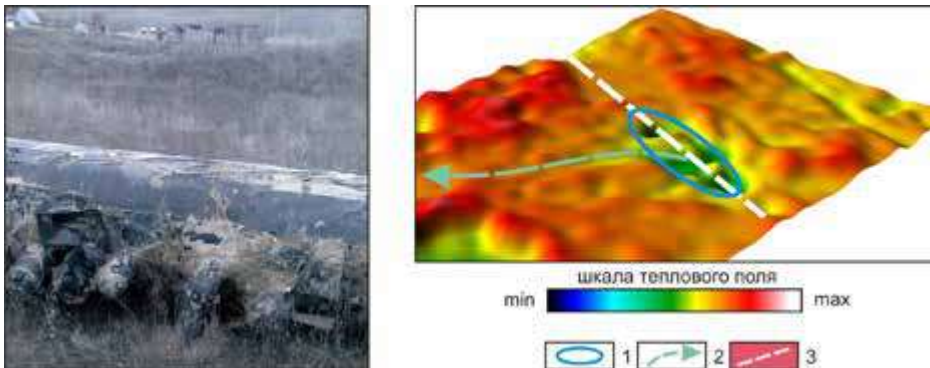


Рис. 7.10. Искусственная врезка на фотоснимке и проявление в аномальном тепловом поле на глубине 1.5 метра.
Условные обозначения: 1 – область несанкционированного нарушения среды, 2 – линия отвода от врезки, 3 – местоположение нефтепровода

7.5. Оценка экологического загрязнения в акватории Финского залива города Санкт-Петербурга

Загрязняющие сбросы в акваторию рек и водоемов имеют, как правило, повышенную температуру. Поэтому ИК аэросъемку экологического мониторинга водных объектов с целью обнаружения источников загрязнения следует выполнять ранней весной или поздней осенью, когда наблюдаются максимальные тепловые контрасты между выбросами и холодной водой акватория. Солнечный нагрев выравняет температурные контрасты сбрасываемых и фоновых вод, поэтому его влияние должно быть исключено. Это достигается съемкой в ночное время суток или в пасмурную погоду.

Исследуемыми объектами водоканала г.Санкт-Петербурга стали сооружения Северной станции аэрации (ССА) и Центральной станции аэрации (ЦСА), а также выпуски очищенных сточных вод в акваторию Финского залива. Город Санкт-Петербург разделен на бассейны общесплавного канализования. Схемы загрязнения донных отложений акватории залива по данным авиационного тепловизионного зондирования, совмещенные с космическим снимком, приведены на рис.7.11. Установлены зональные тепловые аномалии при пересчете поля на глубину до 3–5 м, которые разделяют акваторию залива на ряд областей, отличающихся по степени загрязнения донных отложений биогенными и химическими элементами.

Северная станция аэрации – крупнейший комплекс по очистке сточных вод на правом берегу Финского залива в районе поселка Ольгино. Проблема сточных вод состоит не только в том, что они могут загрязнять запасы питьевой воды, но и влиять на состояние природных водоемов, в которые попадают. Рассеянный выпуск очищенных сточных вод ССА в акваторию залива производится на расстоянии 1.5 км от берега. Эффективность станции для сегодняшнего дня достаточно высока. Однако в процессе анализа материалов авиационной съемки установлены зональные тепловые аномалии на глубинах 1–3 м, которые разделяют акваторию на три области, отличающиеся по степени загрязнения донных отложений биогенными и химическими элементами. На рисунке в

тепловой форме отображения (красный цвет – тепловая аномалия, синий – холодная аномалия) выделяются зоны максимального ($S=0.58 \text{ км}^2$), среднего ($S=0.82 \text{ км}^2$) и минимального загрязнения. Учитывая историю строительства ЦСА и сроки ввода очистных сооружений, можно предположить, что степень загрязнения акватории залива изменялась в течение длительного времени.

Центральная станция аэрации – комплекс по очистке сточных вод, поступающих в основном из центральной части г.Санкт-Петербурга по глубоководному коллектору, а также с Васильевского острова по коллектору, проложенному по дну Финского залива. Станция располагается в Невской губе на острове Белом.

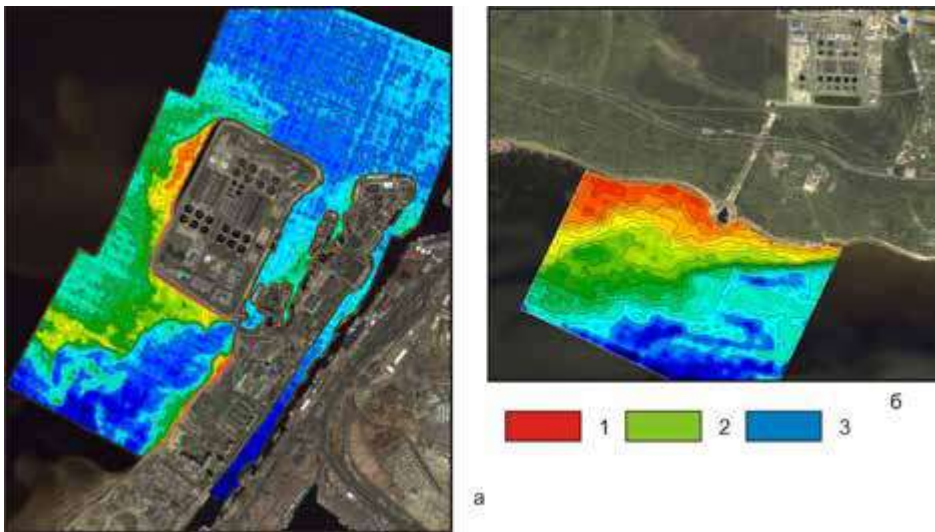


Рис. 7.11. Схемы загрязнения акватории Финского залива очищенными сточными водами Центральной (а) и Северной (б) станциями аэрации г.Санкт-Петербурга.
Условные обозначения зоны загрязнения:
1 – сильного, 2 – умеренного, 3 – слабого

На рисунке показаны эффекты сброса воды ЦСА за период с 17 по 20 апреля 2007 г. Рассматриваемая зона содержит четыре ярких (красно-зеленых) пятна повышенного теплового поля и множество мелких ореолов

рассеивания, вытягивающихся по направлению стока воды, в сторону южной оконечности Финского залива до Морского канала. Из-за несовершенства технологии глубокого удаления биогенных элементов, нефтепродуктов, тяжелых металлов происходит накопление концентрации активного ила в прибрежной части акватории.

По результатам обработки тепловизионной съемки построена карта-срез и локализованы места избыточного содержания активных веществ в донных осадках. Приведенный результат показывает нарушение естественной водной среды (площадью в 0.25 км² максимального и более 0.46 км² умеренного уровня), которая была подвержена за последнее время сильному изменению.

Таким образом, хотя рассеянный выпуск очищенных сточных вод в акваторию залива производится на большом расстоянии от берега, все же наблюдается экологическое нарушение прибрежной части. Следовательно, с использованием авиационного тепловизионного зондирования можно эффективно проводить мониторинг природной среды в условиях акватории Финского залива, изучая условия и места накопления с предельно допустимой концентрацией вредных веществ. Съемкой установлено, что станция аэрации города Санкт-Петербурга проводит очистку сточных вод с высокой эффективностью. Нами не обнаружены признаки локального загрязнения акватории вдали от береговой линии.

7.6. Оценка экологического риска зоны отдыха «Винновская роща» города Ульяновска

Рассмотрим применение дистанционного тепловизионного метода при диагностике экологического состояния природно-техногенной среды в городских условиях [34]. Основной задачей являлась оперативная оценка экологического состояния геологической среды, подвергшейся техногенному воздействию в результате деятельности человека.

Выявление потенциальных источников загрязнения нефтепродуктами родников в парке культуры и отдыха (ПКиО) «Винновская роща» г. Ульяновска проводилось в соответствии с ранее полученными данными экологических и геологических исследований, по которым определен тип загряз-

няющего вещества – дизельное топливо. Установлена степень загрязнения подземных вод и их выходов (родников) нефтепродуктами. Определено, что приток дизельного топлива продолжается вплоть до настоящего времени и интенсивность его продвижения к родникам и тальвегам оврагов возрастает. В относительной близости от парка на Волжско-Свияжском водоразделе расположен ряд техногенных объектов (потенциальных источников загрязнения) – автозаправочные станции, моторный завод, промышленные объекты Куйбышевской железной дороги.

В структурном отношении в пределах ПКиО располагается эрозионная долина неогенового времени заложения шириной около 1.8 км и глубиной до 40 м (рис.7.12). Нижнемеловые аптские глины (K_{1a}), подстилающие дно палеодолины р.Свияга, в районе парка залегают на глубине 80 м и имеют наклон к северо-западу. На размытую поверхность глин наложены плиоценновые акчагыльские (N_{2a}) пески с галькой и гравием, с мало-мощными линзами глин. Выше абсолютных отметок 106–108 м залегают неогеновые глины мощностью до 8 м с прослоями песков. Озерно-аллювиальные эоплейстоценовые (laQ_E) породы представлены песками с галькой, щебнем, с прослоями суглинков.

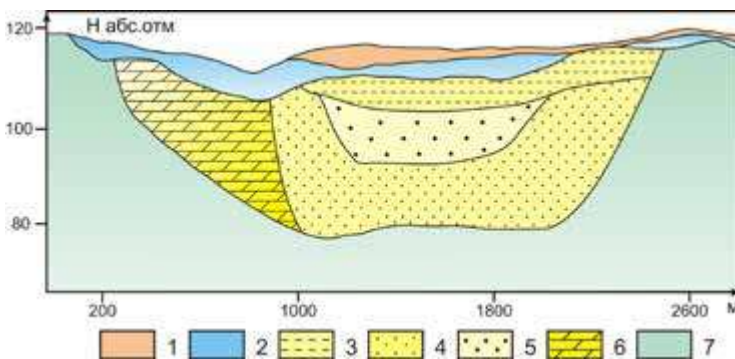


Рис. 7. 12. Схематический разрез палеовреза Волжско-Свияжского водораздела. Условные обозначения: 1- почвенно–растительный слой; 2 – глины и суглинки озерно-аллювиальных отложений; 3 – глина; 4 – песок с галькой; 5 – песок; 6 – нарушенные плотные породы меловой системы; 7 – нижнемеловые глины

Многочисленными картировочными скважинами вскрыт основной водоносный горизонт на абсолютных отметках 90–94 м, распространенный в пределах всей долины. Мощность водоносного безнапорного горизонта достигает 16 м. Вмещающими породами этого горизонта являются пестрые по составу пески и песчано-галечные отложения. Породы не выдержаны по литологическому составу и мощности. Грунтовый поток флюидов в ряде мест из-за тесной гидравлической связи и перетоков через разноглубинные окна часто переходит из одних отложений в другие. При этом меняются его мощность, скорость фильтрации, а местами, упираясь в слабопроницаемые породы, поток обходит их, теряя непрерывность своего распространения.

Экологической геологией установлено, что общее направление потока подземных вод идет к реке Волге. Но наличие древних оползней на левом борту неогеновой долины правобережного притока реки Свяги существенно осложняет гидрогеологическую обстановку и затрудняет установление локального направления потока подземных вод. Таким образом, условия формирования гидрологической обстановки на Волжско-Свяжском водоразделе определяется следующими факторами: наличие в разрезе неогенового вреза, соединяющего на глубине русла двух рек; абсолютные отметки поверхности изучаемой территории колеблются в пределах 60–125 м и относительный уровень р.Свяга по рельефу местности превышает уровень реки Волга; в период весеннего паводка происходит интенсивная гидравлическая связь рек за счет подземных вод; движение глубинных вод в пределах палеодолины может иметь дополнительную направленность формирования – с бортов к наиболее глубокой ее части.

Решение задачи проводилось комплексно. На первом этапе определены степень и площадь загрязнения почв и грунтов нефтепродуктами путем бурения скважин с отбором проб на выявление нефтепродуктов. Площадь загрязненных почв и грунтов составила около 14 тыс.м². Проведен геохимический анализ грунта и воды по наблюдательной сети, состоящей из 9 скважин, 16 родников и 6 гидрологических пунктов. По результатам исследований выявлено повсеместное превышение предельно допустимой концентрации содержания нефтепродуктов, которое местами достигло 260 тыс. мг/л (рис.7. 13).

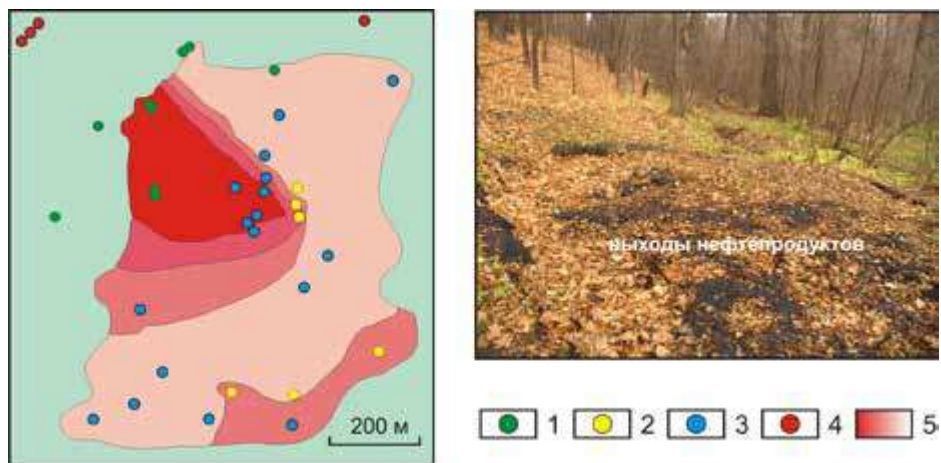


Рис. 7. 13. Зона загрязнения нефтепродуктами ПКИО «Винновская роща».
Условные обозначения: 1 – скважина наблюдательная;
2 – гидрологический пункт; 3 – родник; 4 – скважина поверочная;
5 – контур загрязнения подземных вод

На втором этапе выполнена съемка и интерпретация тепловизионных данных по участку ПКИО «Винновская роща» Волжско-Свияжского водораздела с целью изучения особенностей строения осадочного чехла, выявления источника загрязнения и путей миграции подземных вод и нефтепродуктов. В результате обработки снимков в инфракрасном диапазоне получены геотермические карты и модели среды. По характеру изменения теплового поля выполнено картирование блоково-разломной структуры, установлены потенциально возможные зоны распространения флюидов в среде, проведено ранжирование зон по степени принадлежности к источникам загрязнения нефтепродуктами.

При решении инженерно-геологических задач основным требованием к выбору времени тепловизионной съемки – минимизация помех со стороны природных факторов, влияющих на эффективное выявление эндогенного теплового излучения. К этим помехам относят повышенный солнечный нагрев земной поверхности, растительный покров, увлажненность почвы [87]. Исходя из этого, самым оптимальным периодом аэросъемочных работ считается поздняя осень перед выпадением снега.

Метеорологические условия ИК съемки были следующие – максимально сухая безветренная погода и сплошная облачность. Это связано с необходимостью исключения аномальных температурных контрастов на получаемых снимках.

Комплексная интерпретация данных тепловизионной съемки позволила составить многоуровневые срезы термодинамического поля для верхней части осадочного чехла, что способствовало выявлению зон повышенной проницаемости и флюидного обмена, выделению зон сжатия и растяжения, влияющих на фильтрационные параметры и динамические связи горизонтов. В зонах сформированной долины происходит разуплотнение среды, ослабление прочности грунта, образование провалов и обводнения. При миграции вод по таким участкам происходит скрытый перенос загрязнения на значительные расстояния от источника до мест проявления – родникам.

Наиболее интересный результат состоит в выделении относительно низкотемпературных аномалий и их градиентных зон осадочного чехла. Физическая среда представляется в виде модели с конфигурацией контрастного изменения потока теплового излучения. Поэтому о крупных и разнотипных структурах можно косвенно судить по высокой или низкой скорости изменения поля. Однородные по морфологии блоки окрашены равномерно, с незначительным увеличением или уменьшением цвета. Некоторое различие поля внутри объекта в виде локальных зон указывает на сильную расслоенность, изменчивость внутренней структуры среды.

Основное направление проходит по Волжско-Свияжскому водоразделу от возможного источника загрязнения Куйбышевской железной дороги до района ПКЮ «Винновская роща» (рис.7. 14). Оно имеет ярко выраженный характер на всем своем протяжении вплоть до мест обнаружения наибольшей концентрации нефтепродуктов. Дальнейшее простираение этой зоны соответствует участку загрязнения. Приближаясь к реке Волга, она раздваивается, повторяя форму загрязнения, выявленную ранее инструментальной съемкой. Морфология рельефа дневной поверхности показывает, что проникновения флюидных потоков в этом направлении не накладывает каких-либо ограничений на распространение нефтепродуктов.

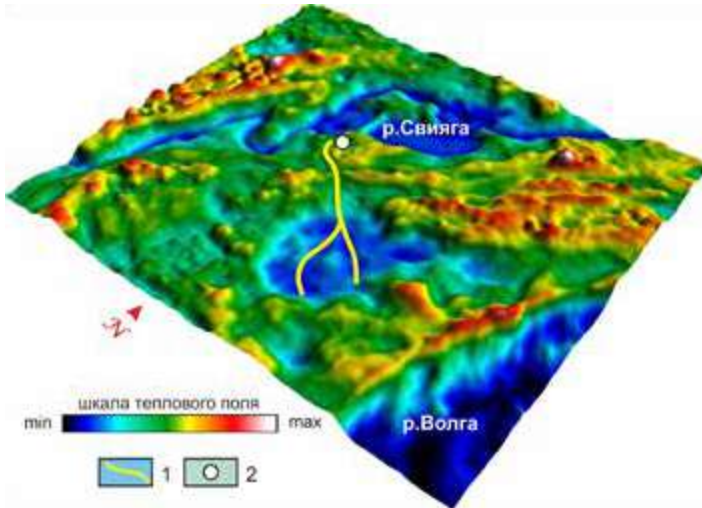


Рис. 7. 14. Модель теплового поля на глубине 30 м города Ульяновска. Условные обозначения: 1 – зона миграции подземных вод и нефтепродуктов; 2 – местоположение источника загрязнения зоны отдыха

Интенсивность теплового поля в центральной части парка достигает минимальных значений и разбивается на отдельные локальные участки. По границе парковой зоны тепловой поток образует кольцевую структуру, заключенную множеством относительно горячих зон с распространением до глубин 100–300 м. Создается некоторая дискретность среды, состоящая из разноплановых неоднородностей. По картам-срезам теплового поля в объемном представлении и в плоскости отображения визуально отчетливо проявляется относительно холодная зона шириной 60–120 м.

В ходе длительного воздействия нефтепродуктов нарушается естественное равновесное состояние геологической среды. Возникает ситуация, при которой легкие углеводороды по зонам латеральной трещиноватости среды и крупным разломам устремляются к дневной поверхности за счет перепада давления. При этом изменяется не только структура флюидов, заполняющих трещины и разуплотнение горных пород, но и плотность потока теплового излучения среды. Это отража-

ется на характере развития растений, так как растворенные углеводороды оказывают негативное воздействие на их корни. В результате можно выделить три степени изменчивости растительного покрова за счет отсутствия (*нормальная*), незначительного и сильного (*аномальная*) влияний эндогенного процесса.

На третьем этапе по нашим рекомендациям пробурено четыре скважины до глубины 35 м в зонах предполагаемой миграции флюидов в среде, с отбором проб и геохимическим анализом грунта и воды. Данные бурения скважины показали, что, хотя путь миграции нефтепродуктов с восточной стороны от моторного завода является возможным, содержание загрязняющего вещества в породах зоны аэрации и подземных водах не обнаружено.

Учитывая направление потока глубинных вод с запада на восток, проходящего через территорию Ульяновского отделения Куйбышевской железной дороги, мы предположили, что флюиды могут быть загрязнены нефтепродуктами и напрямую достигать скважин и родников. Поэтому по результатам тепловизионных исследований в районе объектов железной дороги на пути предполагаемой миграции нефтепродуктов весной 2008 года были пробурены три поверочные скважины, которые полностью подтвердили наши предположения. В зоне установленного направления миграции нефтепродуктов содержание дизельного топлива в пробах воды значительно превышает предельно допустимую концентрацию (до 55 тыс. мг/л).

Основные задачи ликвидации очага загрязнения на территории природного комплекса «Винновская роща» города Ульяновска: картирование контуров погребенной долины и кровли слабопроницаемой толщи в зоне аэрации; уточнение размеров линзы нефтепродуктов; выявление утечек нефтепродуктов из хранилищ и продуктопроводов промышленных объектов Куйбышевской железной дороги, расположенных в пределах развития погребенной долины; разработка мероприятий по ликвидации очага загрязнения и реабилитации природной среды по результатам дополнительной инструментальной съемки.

7.7. Мониторинг теплового поля Ашальчинского месторождения природных битумов Южно-Татарского свода

Опыт в освоении месторождений тяжелой (битуминозной) сверхвязкой нефти ставит перед нефтяниками новые практические задачи. Установлено, что оптимальной технологией разработки залежей природных битумов является парогравитационное воздействие на среду. С помощью диагностики геологической среды Ашальчинского месторождения битумов на основе тепловизионной космической и авиационной съемок нами изучены эндогенные тепловые потоки и динамические условия флюидов среды, обоснован принципиально новый подход по контролю над освоением залежей природных битумов в период парового воздействия на залежь. К основным задачам мониторинга парогравитационного режима эксплуатации объекта следует отнести: изучение изменения динамических параметров флюидов среды и выявление структуры поля теплового излучения с классификацией неоднородностей по форме; определение в объеме мест кумуляции и миграции подземной вод, пара и нефтепродуктов в пределах добычи тяжелой нефти для пары скважин – нагнетающей и добывающей; составление объемной модели термодинамического поля с оценкой условий разработки месторождения (изменения паровой камеры во времени, силы воздействия искусственного тепла на прогрев пласта, определение зон поглощения теплоносителя) и выработки рекомендаций по эффективному парогравитационному воздействию.

В региональном тектоническом плане Ашальчинское месторождение располагается на западном склоне Южно-Татарского свода. Залежь битума установлена в песчаном пласте шешминского горизонта уфимского яруса, представляющего собой брахиантиклинальную складку с амплитудой поднятия 36 м и размерами 2.5 x 4.5 км. Глубины залегания продуктивных отложений изменяются от 48 до 124 м. Песчаники образуют литологические седиментационные ловушки, контролирующие залежи битумов.

На этапе технологического процесса парового воздействия на битумный пласт через горизонтально расположенные скважины 1 и 2 (рис.7.15), авиационной съемкой [36] удалось обнаружить локальные особенно-

сти распространения искусственно созданного тепла в осадочном чехле. Формальными критериями выделения неоднородностей геотермического поля могут быть их размеры, форма, контрастность, положение осей аномалий, линии и плоскости, по которым происходит смещение аномалий.

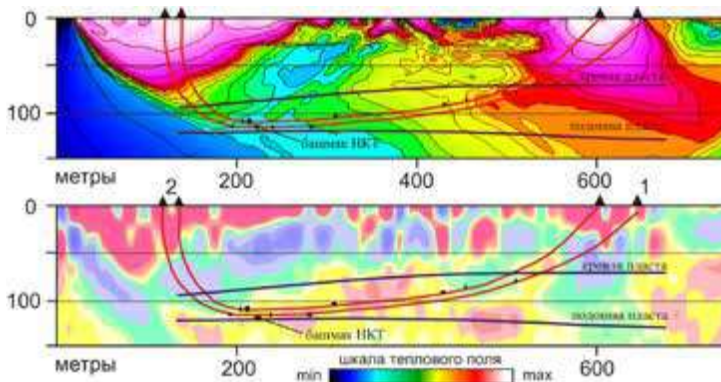


Рис. 7. 15. Модель среды в изолиниях плотности теплового потока интегральной и дифференциальной характеристик поля Ашальчинского месторождения битумов

Повышенная температурная характеристика среды пространственно совпадает с областями разработки битумного месторождения. Форма рисунка изолиний теплых источников отвечает литологическим комплексам верхнего структурного этажа. Вытянутость тепловых зон и сгущение изотерм близко к структуре продуктивной песчаной пачки. Они проявляются в форме низких, высоких и переходных температурных аномалий с формированием низкотемпературной сланцеватостью.

Искусственное тепловое воздействие на геологическую среду проявляется в ограниченном прогреве пород, расположенных между двумя скважинами 1 и 2, охватывающих зону протяженностью не более 1.2 км и глубиной 0.4 км. Различие в интенсивности прогрева среды по площади выражается в образовании двух локальных областей сферической формы (вблизи нагнетательных скважин) с радиальным направлением вектора плотности теплового потока. Нагнетательные и добывающие эксплуатационные скважины располагаются в различных температурных блоках, которые разделены между собой узкой зоной приповерхностно-

го разлома, насыщенного низкотемпературным флюидом (водой). В этом случае при искусственном тепловом воздействии на среду влияние существующего природного фактора, приведшего к возникновению температурного градиента вблизи скв.2, значительно, и холодная зона изменяет процесс теплопередачи в песчаной пачке, существенно уменьшая эффект прогрева разрабатываемого блока. Это свидетельствует о присутствии крупного конвективного подтока из глубины. Установленная нами аномальная холодная зона может существенно препятствовать распространению искусственно созданного тепла в среде. Установленный факт в дальнейшем подтвержден инструментальными наземными наблюдениями, и при проектировании новых скважин учитывались данные ТВТ.

Детальной съемкой с высоты полета 0.5 км вырисовываются три крупные, с незначительным наклоном, теплопроводящие зоны: высокотемпературные локальная (скв.2), региональная (скв.1) и низкотемпературная узкая, промежуточная. Степень воздействия их на среду различна. От сочетания с подобным типом температурного развития в чехле, образующего единый гидродинамический узел и управляющего миграцией пара, следует ожидать процессы накопления или перетоков флюидов в среде, которые происходят не только в песчаной пачке уфимского яруса, но и за контуром этих отложений. Об этом свидетельствует формирование своеобразной температурной складчатости с многочисленными отслоениями и, прежде всего, над разломами. Отслоения создают полости, благоприятные для инъекции и скопления флюидных и газовых эманаций.

Одна из таких зон, расположенная в левой части профиля, препятствует процессу прямого температурного воздействия на среду. В свою очередь, она разделена узкой, местами разобщенной сдвигами полосой относительно высоких значений потока. Другая температурная полосовая аномалия находится в правой части профиля на глубине 80–100 м. Есть все основания считать, что прогрев пород, контролируемый данной полосой, привел к формированию в пределах осадочной толщи благоприятных зон для ловушек тяжелой нефти. Во фронтальных частях этих двух аномалий располагается слабо выраженная переходная зона, по всей видимости, указывающая на местоположение воздействия глубинного флюида.

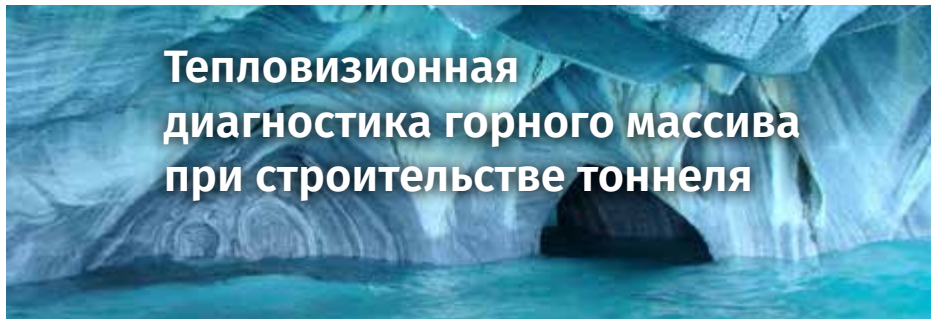
По типу строения битумы в уфимских отложениях относят к массивным залежам. Подошва залежи битумов имеет ступенчатый характер, по данным структурного бурения. Поэтому не следует ожидать ярко выраженной температурной аномалии в нижней части разреза, амплитуда которой плавно уменьшается с глубиной.

Надежной крышкой для битумных залежей служат глины, имеющие повсеместное распространение толщиной 4–10 м. В пониженных частях поверхности уфимских отложений толщина их достигает 22 м. Они надежно защищают залежь от влияния повсеместно распространенного водоносного горизонта, имеющего напорный характер. В связи с этим глины и аргиллиты, обладающие низкой теплопроводностью и располагающиеся в кровле залежи, создают в межскважинном отрезке приповерхностную низкотемпературную аномалию. Их влияние на растекание ТП усиливается на пикетах 250–400 м в результате линейной насыщенной флюидом зоны, связанной с разуплотнением пород. В ряде скважин при опробовании кровельной части пласта песчаной пачки получен приток воды с битумом, причем количество воды явно преобладало над битумом. В дальнейшем высказано предположение, и оно подтвердилось исследованиями, что причинами появления воды, получаемой при опробовании скважин, являются небольшие водоносные пласты внутри битумной залежи. Наличие насыщенных водой пластов в кровельной части и внутри залежи часто приводит к осложнениям в процессе ее разработки.

Исходя из материалов тепловизионной съемки, основанных на комплексной обработке космических и авиационных снимков, можно отметить, что плотность потока теплового излучения в среде формируется из ряда источников. Во-первых, из регионального эндогенного поля Земли, распространяющегося с больших глубин к дневной поверхности по ослабленным зонам. Во-вторых, из вновь сформированного приповерхностного источника поля, образованного в результате физико-химических процессов, происходящих в геологической среде и охватывающих залежи природных битумов. В-третьих, на суммарное эндогенное поле накладывается дополнительный искусственный источник тепла, создаваемый при технологическом процессе разработки месторождения на основе парового воздействия на среду. Следовательно, интегральная характеристика потока теплового поля состоит из трех составляющих, разделе-

ние которых проведено с использованием материалов разновременных тепловизионных космических снимков, высотной (0.5, 1 и 2 км) съемки и применения алгоритма дифференциальной трансформации величины поля с целью построения синтезированных моделей.

Таким образом, тепловизионные исследования, проведенные на основе авиационной съемки в неустановившемся геотермическом состоянии среды, позволили определить наличие локальных температурных аномалий и фронт их распространения, приуроченных к продуктивной части пласта. Для оперативного принятия управленческих решений в дальнейшем следует рекомендовать режимные авиационные наблюдения геотермического поля Ашальчинского месторождения, которые позволят своевременно (один раз в три месяца) получить текущую информацию о разработке залежи битумов в период парового воздействия на пласт.



«Мирская жизнь – всего лишь игра и потеха, а Последняя обитель – это настоящая жизнь...»
(Сура «Аль-Анкабут», 29:64)

وَمَا هَذِهِ الْحَيَاةُ الدُّنْيَا إِلَّا لَهْوٌ
وَلَهْوٌ وَإِنِ الْآخِرَةُ
لَهُوَ الْحَيَاةُ لَوْ أَنُوا يَعْلَمُونَ

8.1. Методика тепловизионного зондирования горного массива

При проведении в шахтах работ, на протяжении всей проходки подземных горных выработок, в зависимости от этапов производственного процесса применяются различные методы геодезического, геологического и геофизического контроля. Сейсмоакустические методы занимают на сегодняшний день одно из ведущих мест в горной геофизике. При выполнении комплекса предупредительных защитных мероприятий, включающих в себя размещение устройства для сбора, обработки и передачи данных в зоне ведения горных работ, применяются способы сейсмического просвечивания и локации напряженно-деформированного состояния горного массива. В ходе реализации этого метода требуется позиционирование датчиков упругих колебаний, их закрепление во вмещающем горном массиве и возбуждение волновых полей в среде [16]. Стоит отметить, что указанный способ достаточно трудоемок при проведении работ по сбору исходного сейсмического поля. Он требует больших временных и материальных затрат и не позволяет получить оперативную геологическую информацию о тоннеле в интервале глубин 0–10 метров.

Известен другой способ контроля, не разрушающий поверхности тоннеля. Это электромагнитный метод, позволяющий следить за различием

природы среды по величине удельного электрического сопротивления, дает представление о структуре пород в точках зондирования. Такой подход имеет значительные ограничения в получении информации о геологии забоя и носит формальный характер исследования среды при наличии фильтрации и мест концентрированных течей.

Рассмотрим новый способ мониторинга сред, который относится к области инженерной геофизики, а именно к методу тепловизионного зондирования горного массива в процессе строительства подземных сооружений (транспортных тоннелей и метрополитенов). Метод основан на регистрации температурного поля поверхности геологической среды, находящейся в поле обзора регистрируемой системы, и анализе тепловизионных снимков в различных спектрах оптического излучения. Он предусматривает многоуровневую тепловизионную съемку забоя тоннеля, которая значительно расширяет возможности разрешающей способности зондирования в недрах Земли. Это принципиально новое направление практических исследований, защищенное патентом Российской Федерации на изобретение [76].

Метод тепловизионной диагностики геологической среды и мониторинга состояния устойчивости горного массива в процессе проходки транспортных тоннелей заключается в следующем (рис.8.1). Путем последовательной подземной съемки исследуемого объекта – забоя тоннеля в процессе его строительства – при помощи аппаратуры высокого разрешения с температурной чувствительностью 0.02°C регистрируют тепловизионное монохромное изображение в диапазонах видимого спектра и дальнего инфракрасного интервала длин волн 8–14 мкм. Спектрзональную съемку проводят путем перемещения тепловизионной системы на расстоянии *забой–тепловизор* от 5 до 50 метров. Глубина зондирования достигает 0–15 метров в зависимости от разрешающей способности регистрируемого тепловизионного снимка, которая, в свою очередь, определяется размером пикселя системы, расстоянием до объекта съемки и характеристиками измерительной аппаратуры. В предпочтительном варианте реализации технологии в строящемся тоннеле горного массива выбирают интересующую область геологической среды и делают снимки выбранного участка целиком с максимально дальнего расстояния, получая наложенные изображения в диапазонах видимого спектра и дальне-

го инфракрасного интервала длин волн. Минимальное и максимальное расстояния до объекта съемки подбираются опытным путем и определяются размерами стандартного забоя при проходке тоннеля, а также возможностями тепловизионной системы.

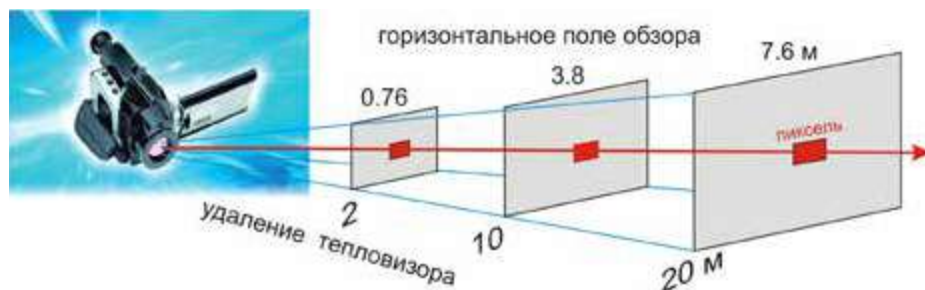


Рис. 8.1. Схема формирования оптической системы камеры NEC R500 AVIO

Получив первые снимки всей выбранной области, проводят обработку и анализ полученного изображения. В первую очередь, выделяют характерные геотермические признаки интенсивности поля, позволяющие сделать предварительные выводы о наличии опасных участков в геологической среде. К примеру, можно спрогнозировать потенциальную опасность прорыва подземными водами стенок тоннеля и их разрушения при дальнейшем проведении работ. При отсутствии характерных геотермических признаков опасных зон (*признаков появления или усиления притока воды в забой*) дальнейшую съемку можно не проводить.

В случае обнаружения таких признаков участки теплового поля разбивают на локальные зоны. Далее продолжают съемку выделенных зон, приближая аппаратуру на один шаг и получая очередную серию снимков в видимом и инфракрасном спектрах в уже более крупном масштабе. По мере приближения к объекту, исследуемую зону следует «разбивать» на все более мелкие фрагменты, получая серии снимков каждого последующего фрагмента. Съемку продолжают до достижения минимально допустимого расстояния, определяемого возможностями тепловизионной аппаратуры и размером пикселя изображения. Шаг зависит от размеров исследуемой области и количества получаемых фрагментов, что на практике составляет, как правило, 5–10 метров.

После завершения съемки все полученные снимки обрабатывают и анализируют, а по истечении двух–трех часов формируется заключение. Анализ изучаемой области геологической среды начинают с первых снимков полной поверхности. При отсутствии характерных геотермических признаков, указывающих на наличие опасных участков выхода флюидов на поверхность, анализ и обработку оставшихся снимков можно завершить. Предпочтительный вариант изобретения направлен, в первую очередь, на детальное исследование и выявление опасных зон в геологической среде в направлении проходки.

По другому варианту реализации технологии проводят съемку без предварительного выделения опасных зон на начальных снимках. В этом случае после получения первых снимков всей области геологической среды проводят полную детализацию всего изображения и фрагментируют интересующую область. Далее таким же образом продолжают пошаговое приближение к объекту с последующей детальной фрагментацией зон. Данный вариант направлен, в первую очередь, на исследование различных характеристик горных пород исследуемой геологической среды. Анализ проводится только после полного проведения съемки. Возможные опасные участки могут быть выявлены по результатам анализа объемной модели геологической среды.

В обоих вариантах после получения первой серии снимков возможно формирование региональной объемной структуры эндогенного потока теплового излучения с классификацией неоднородностей в виде блоково-разломных структур. Выделяют характерные геотермические признаки, связанные с тепловыми аномалиями, которые позволяют пространственно локализовать в геологической среде объемную концентрацию залежей и путей миграции воды. Такая обработка первой серии снимков позволяет оперативно ранжировать по глубине опасные участки и оценить возможные риски выхода флюидов на поверхность при дальнейшем продолжении работ.

На опасных участках проводят детальное спектрозональное тепловизионное зондирование геологической среды путем равноудаленной съемки. Многоуровневая съемка позволяет получать результаты в региональном и детальном масштабах. Перед анализом снимков дополнительно проводят их отбор и предварительную обработку. Отбор сним-

ков осуществляют по следующим критериям: масштаба исследований; оптимального покрытия изучаемого участка среды кадрами; отсутствия внешних тепловых помех на участке; диапазон значений интенсивности теплового поля.

Первичную обработку снимков осуществляют путем перевода данных из исходного вида в стандартные форматы, т.е. составлением «мозаик» из нескольких снимков, синтезированием, устранением помех и подавлением шумов, привязкой изображений с использованием опорных точек. Установлено, что улучшение изображений необходимо проводить на основе определенного набора критериев, которые снижают влияние техногенных помех при выявлении эндогенного теплового поля. Сверхнормативная шероховатость поверхности выработки может повлиять на качество исходных снимков.

Демонстрационную графику выполняют с применением пороговой фильтрации изображений. В этом случае сечение или плановая конфигурация локальных зон соответствует тектоническим активным участкам, описание которых адекватно отражает представления о характере строения среды. Интерпретация полученных данных включает в себя морфоструктурное районирование по интенсивности плотности потока теплового излучения геологической среды, определение природы аномалий образующих геологических объектов, зон разуплотнения пород с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами. В состав коллектора входят зоны перетоков и накопления флюидов, потенциально являющиеся природными резервуарами воды.

Результативные объемные карты тепловизионного зондирования геологической среды составляют путем морфоструктурной интерпретации и наложения полученных данных на видимые векторные снимки высокого разрешения с добавлением необходимой текстовой и графической информации, включающей результаты тематической классификации геологических объектов. Преимуществами предлагаемого способа являются информативность данных и высокая производительность работ, а также относительная дешевизна процессов исследования тоннелей и горных выработок.

8.2. Тестирование метода при строительстве транспортного тоннеля

Рассматриваемый способ апробирован при изучении геологической среды в процессе строительства подземных сооружений на объектах Олимпиады-2014 в условиях города Сочи. В настоящее время завершено строительство шестнадцати транспортных тоннелей протяженностью более 16 км. Работа выполнена в сложных инженерно-геологических условиях (*неритмичное чередование тонкослоистых пород, низкие прочностные характеристики, техногенная нагрузка*), в неустойчивой тектонофизической обстановке (*расчлененный рельеф, развитая система дизъюнктивных и пликативных нарушений, высокая сейсмичность*), в переменном гидрологическом режиме (*грунтовые воды имеют локальное распространение и носят спорадический характер с плохо изученной структурой насыщенности горного массива*). Разработка калотты горной выработки проходила роторным комбайном или гидромолотом короткими заходами по 1–3 метра. Размер калотты 12х6 м.

Тепловизионная диагностика включала проведение съемки геологической среды, получение и обработку снимков в диапазонах видимого спектра и дальнего инфракрасного интервала длин волн с формированием объёмной модели блоково-разломных структур плотности теплового потока, последующей интерпретацией полученных данных и составлением результативной графики. Предусматривались оперативные мероприятия по предупреждению и устранению возможных негативных последствий – критического состояния устойчивости массива в процессе проходческих работ.

Съемка велась с пошаговым линейным приближением к выделенной области геологической среды. На основе первой серии полученных снимков проведен анализ однородности горного массива, определены местоположения подземных вод в среде и опасных зон выхода флюида. По факту выявления опасных участков выполнялась их детализация при помощи равноудаленной съемки с последующим приближением вплоть до получения снимков с максимальным разрешением. На основе интерпретации объёмной модели блоково-разломных структур плотности потока

был сформирован трехмерный образ геологической среды с выделением характерных геотермических признаков минимальной и максимальной интенсивности поля. По этим признакам делаются выводы о физических свойствах пород и определяются опасные техногенные участки распределения подземных вод в горном массиве. После разбиения снимков на зоны проводилось ранжирование опасных участков по глубине.

Количество и размеры выделенных зон зависят от масштаба исследований (*шага съемки*), оптимального покрытия изучаемого участка среды кадрами, отсутствия влияния техногенных помех, диапазона распределения значений интенсивности теплового поля для кадров. Каждую последующую серию снимков делают с шагом 5–10 метров. Максимальное расстояние до выделенной области геологической среды составляет около 50 метров, минимальное 10 метров. В зависимости от конкретных инженерно-геологических условий и принятой схемы организации этапы диагностики проводились либо циклично, по мере продвижения забоя, либо по поточной схеме на достаточно большой длине тоннеля – по окончании проходческих работ. Съемка проводилась не реже одного раза в неделю. Контроль над состоянием среды осуществлялся геологической службой путем инструментальной съемки и визуального наблюдения.

Предварительную обработку полученных материалов осуществляли составлением «*мозаик*» из нескольких снимков, устранением помех и подавлением шумов, привязкой изображений. Окончательная обработка снимков включала определение интенсивности потока теплового излучения Земли с последующей аппаратурной фильтрацией тепловизионного изображения.

Геологическое строение тоннеля представляет собой отложения палеогенового и четвертичного возраста. Литологический состав представлен пачками аргиллитов темно-серого цвета, включающих прослои алевролитов. Грунты в полосе тоннелей по своим свойствам относятся к аргиллитам низкой прочности с явно выраженной слоистостью, размягчающиеся в воде. По виду разрез (рис.8.2) отражает изменение прочностных свойств пород, однотипных по литологическому составу. Водных притоков на представленном забое зафиксировано не было. Этот эле-

мент структуры горизонтальной слоистой толщи является ключевым в понимании опасных явлений, что определяет суть разработанной системы мониторинга.

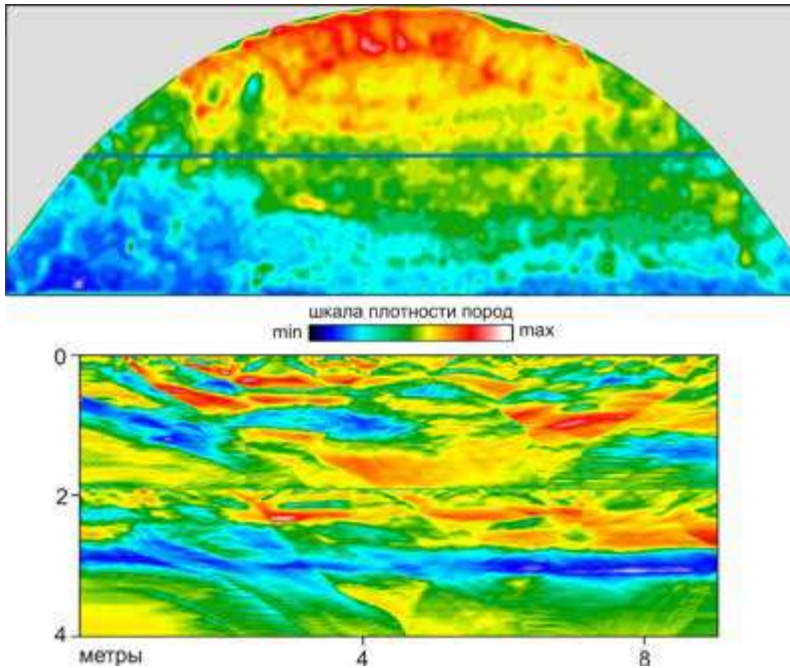


Рис. 8.2. Срез забоя и модель блоково-разломных структур тоннеля 5 ПК-91 м

Строящиеся тоннели не пересекали значимых элементов гидрографической сети района. Притоки воды в выработку обусловлены верховодкой или жильно-трещинными водами, имеющими спорадическое распространение. Обводнение трещиноватых зон элювия и коренных пород имеет ограниченный, обычно локальный характер. Грунтовые воды обладают незначительными местными напорами. Тип движения – струйчатый, прерывистый.

В качестве примера показан рисунок разреза выработки (рис.8.3), на котором отмечена локальная зона с присутствием воды. Съемка сделана с расстояния 30 метров от забоя. В трехмерном пространстве эффективный объем камеры (синего цвета) оценивается в 12 м³, с насыщением

флюида в 4 м^3 . Путем бурения горизонтального шурфа выполнен сброс подземной воды. В процессе проходки прогноз условий 3D-ТВТ был полностью подтвержден.

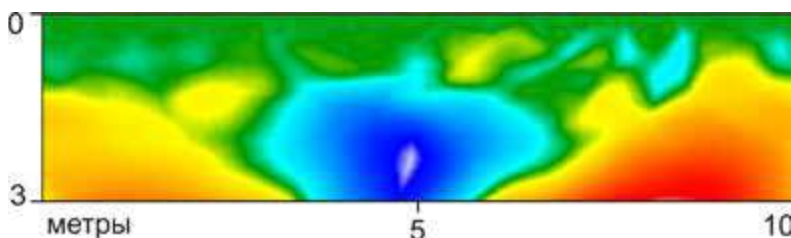


Рис.8.3. Камера с водой в модели блоково-разломных структур тоннеля 7

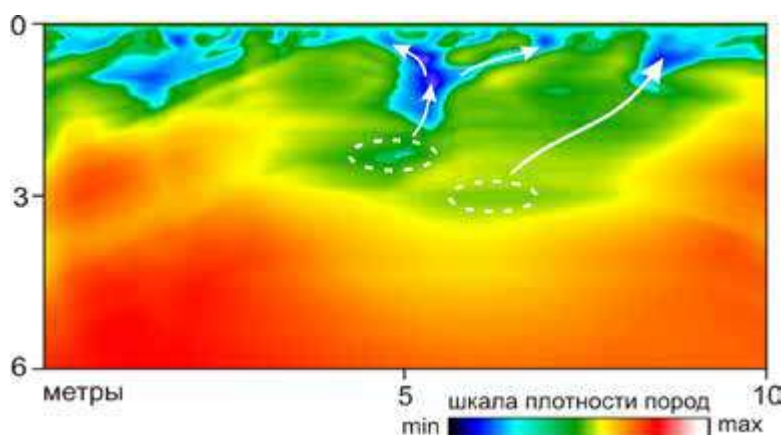


Рис. 8.4. Проявление скрытых камер и пути миграции воды в модели блоково-разломных структур на отрезке ПК-146 м тоннеля 8

Условия проведения мониторинга среды во многом определяются технологической надежностью применяемых проходческих комплексов. В восьмом тоннеле выработка осуществлялась гидромолотом практически по всему диаметру калотты. Регламентными работами не обнаружено опасных зон. Позднее, в результате разработки тоннеля с нанесением точечных ударов, в верхней правой части забоя пошел сильный приток воды с хорошим дебитом. Проходческий комплекс был остановлен, и проведена повторная диагностика участка (рис.8.4). Местоположение

выхода грунтовых вод на разрезе совпало с ПК-6,5 м. Однако скрытые камеры малого объема находились ближе к центру и не представляли большой опасности.

Принятая система оценок эффективности и достоверности качества прогноза по предлагаемой технологии показала высокую сходимость с результатами геологического описания выработки (рис.8.5).

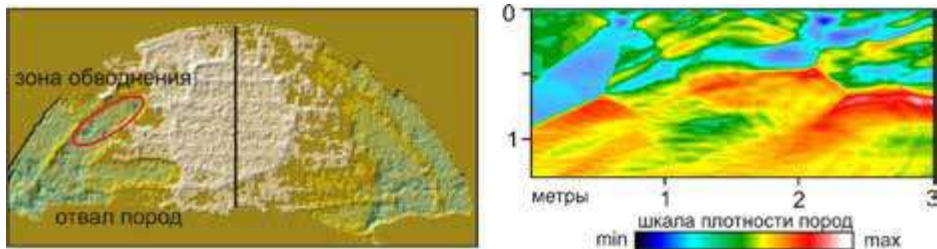


Рис. 8.5. Срез забоя и модель блоково-разломных структур тоннеля 5

Следовательно, к числу задач, решение которых осуществляется методом тепловизионной томографии, относится мониторинг состояния устойчивости горного массива в процессе строительства метрополитена, железнодорожных и автодорожных тоннелей. Предлагаемый альтернативный способ неразрушающего контроля направлен на изучение физической природы среды, эндогенного потока теплового поля на глубину в несколько метров. По геотермическим признакам можно получить наиболее полную и достоверную информацию о направлении процессов трещиноватости и разрушения массива горных пород, выделить участки обводнения среды и пути миграции (перетоки и накопления) вод. Выявление структуры и параметров устойчивости горного массива в динамической системе, которая формируется в реальных средах, является объективной основой для опережающего прогноза развития возможных опасных ситуаций в процессе проведения подземных работ. В результате упрощается получение геофизической информации, повышается точность и достоверность выявления в горном массиве проницаемых зон и скрытых вод, снижается трудоемкость проведения работ при сооружении тоннелей. Полный цикл регистрации, обработки и анализа данных осуществляется исполнителями инженерного уровня, что соответствует требованиям промышленного применения.

Послесловие

За последние три десятилетия научное познание в космической геологии существенно расширилось, появилось множество фундаментальных работ. В нашем издании во всех подробностях рассмотрен метод дистанционного тепловизионного зондирования Земли в инфракрасном тепловом диапазоне спектра. Тепловизионная съемка является одним из наиболее развивающихся геофизических методов и эффективным подходом в изучении геологической среды по эндогенному тепловому полю. Инновационная технология 3D-TBT направлена на оперативное изучение больших площадей, извлечение скейлинговой информации о неоднородности среды и протекающих в ней физических процессах. Созданная база данных способна обеспечить рациональное и эффективное проведения съемки на стадиях региональных, поисковых и разведочных геофизических работ. В результате обзора применения дистанционного метода в геологии успешно решены задачи поиска месторождений углеводородов, подземных вод, рудных и нерудных полезных ископаемых, экологических исследований природных и техногенных систем. Практика наглядно демонстрирует наши возможности, доказывая, что метод 3D-TBT обладает абсолютной «экологической чистотой», высокой производительностью и информативностью. Метод прошел тестирование во многих компаниях мира.

В монографии рассмотрены аспекты формирования геофизических неоднородностей с единой позиции структурно-вещественного преобразования литосферы. Нами объясняется природа термодинамических свойств – реологическое состояние вещества среды. Факты не противоречат априорным знаниям, а в ряде случаев дают современную информацию о строении земной коры. Установлено, что в коре происходит аккумуляция энергии на геотермических уровнях. Следствием этого обнаруживается повсеместная гетерогенность и дискретность блоков ее строения. Физическая характеристика и мощность современных блоково-разломных структур варьирует в широких пределах. Общие источники энергии теплового поля в недрах создают синхронность проявления на всех уровнях. Поэтому мониторинг геодинамических активных зон на основе тепловизионной томографии позволяет более точно выявлять

энергетические центры в земной коре, изучать региональные, зональные и локальные природные явления Земли. Полученные результаты представляют научное и методическое значение, являясь фундаментом выхода на новый уровень исследований.

Отмеченные факты формирования теплового поля земли позволяют нам в дальнейшем рекомендовать изучение природы вулканов, гидротермальных источников и сейсмоактивных явлений недр. Совершенствование системы тепловизионной съемки на основе беспилотных летательных аппаратов с применением ТВТ-технологии открывает большие возможности для повышения геофизической информативности в различных отраслях производства

Все сведения о многообразии протекания геодинамических процессов в геологической среде, которые мы изложили в книге, являются нам очевидную истину. Специалисты научных и производственных организаций, кто непредвзято и логически мысля, проанализирует все приведенные материалы, предельно четко должны осознать и увидеть бесспорную истину, находящуюся перед их взором. Выражаем надежду, что приведенные сведения будут способствовать более глубокому ознакомлению с возможностями дистанционного тепловизионного зондирования.

Сведения об авторах.

Камиль Мидхатович Каримов – окончил Казахский политехнический институт (1977), специальность «Горный инженер-геофизик». Доктор геолого-минералогических наук (1998). Лауреат конкурса «Инженер года России» (2004). Профессор Казанского федерального университета. Действительный член РАЕН отделения «Нефть и газ». Область научных интересов – геофизика, геотектоника, инновационные технологии при поисках полезных ископаемых. Автор более ста научных работ и шести монографий. Для контакта E-mail: kamil1955@inbox.ru

Ляйля Камильевна Каримова – преподаватель Казанского федерального университета, разработчик инновационной технологии в области геофизики. Автор тридцати научных работ, одной монографии и четырех патентов на изобретение Российской Федерации.

Карим Рустэмович Гатауллин – соискатель Казанского федерального университета. Область научных интересов – математика, программирование и обработка геофизической информации.

Отдельные научные разработки – это результат сложного коллективного труда. Авторы выражают признательность своим коллегам Т. Роматовой, В. Онегову, С. Кокутину за компьютерные эксперименты, приведенные в работе. Поддержка в опубликовании монографии оказана компанией «Институт геофизики» (Россия, Казань), Skygeotech™.

Уважаемый читатель, завершая повествование научного издания, прошу Аллаха Субханаху ва Тагаля, чтобы он принял нашу работу.

Ассаляму аляйкум ва рахматуЛлахи ва баракатух.

Амин.

Список литературы.

1. Артюшков Е.В. Основные результаты в области изучения явлений внутри литосферных плит // Динамика и эволюция литосферы. М.: 1986. С. 33–46.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН, 1996. Т. 166. №11. С.1145–1170.
3. Алеев Р.М. Воздушная тепловизионная аппаратура для контроля нефтепродуктопроводов. М.: Недра, 1995. –160 с.
4. Андерсон Д.Л. Сейсмическая томография // В мире науки. 1984. №12. с. 16–25.
5. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под ред. Бондур В.Г. М.: Мир, 2011. –558 с.
6. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991. –376 с.
7. Басниев К.С. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986. –303 с.
8. Бек Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989. –312 с.
9. Белов В.В. , Молчунов Н.В. Восстановление космических снимков Земли с использованием картографической информации. // Оптика атмосферы и океана. 1997. № 7(10). С. 800–805.
10. Булин Н.К. Использование многоволнового ГСЗ при мелкомасштабных прогнозных исследованиях на оруденение и алмазоносность. // Геология и геофизика. 1993. №9. С. 92–106.
11. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964.
12. Буряк В.А. Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1988. –403 с.
13. Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. Казань: ФЭН, 2001. –296 с.
14. Ваньян Л.Л. Слой пониженной скорости и повышенной электропроводности в основании верхней части земной коры Балтийского щита. // Физика Земли. 2002. №1. С. 37–45

15. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беренга, 2008. –230 с.
16. Власова С.В. Методика и технология 3D-3С сейсмических исследований геологического строения и мониторинга состояния устойчивости горного массива в процессе проходки транспортных тоннелей (в условиях г. Большого Сочи). Автореф. Екатеринбург, УГГУ. 2012.
17. Гаттенбергер Ю.П. Гидрогеология и динамика подземных вод с основами гидравлики. М.: Недра, 1990. –171 с.
18. Гарбук С.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М. 1997. –296 с.
19. Гайдук В.В. Методы изучения складчато-надвиговых поясов. Новосибирск: Наука, 1999. –172 с.
20. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. –1072 с.
21. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. –616 с.
22. Гонин Г.Б. Космические съемки Земли. Л.: Недра, 1989. –256 с.
23. Гутман И. Методы подсчета запасов нефти и газа. М.: Недра, 1985. –223 с.
24. Дистанционное зондирование: количественный подход // Под ред. Свейна Ф.М. М.: Недра, 1983. –415 с.
25. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск, 2001. –464 с.
26. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование. // Успехи физических наук. 2001. Т.171. №5. С. 465–501.
27. Джемисон Дж.Э. Физика и техника инфракрасного излучения // Советское радио. 1965. –644 с.
28. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируруемыми источниками поля. Л.: Наука, 1990. –150 с.
29. Зекцер И.С. Подземный водообмен суши и моря. Л.: Наука, 1984. –207 с.
30. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. –77 с.

31. Исаев А.С. Аэрокосмический мониторинг лесов. М.: Наука, 2001. –240 с.
32. Каримов К.М., Аль-Жади Р.А. Строение земной коры и верхней мантии Казахстана по данным магнитотеллурических зондирований. Алматы: Эверо, 2001. –156 с.
33. Каримов К.М. Оценка нефтеперспективности структур в Мелекесской впадине по электромагнитным зондированиям // Георесурсы. 2005. №2(17). С. 41–45.
34. Каримов К.М. Оценка экологического риска зоны отдыха «Винновская роща» г.Ульяновска по данным дистанционного зондирования Земли. СПб.: Российский геофизический журнал. 2009. № 47–48. С.109–114.
35. Каримов К.М. Дистанционное тепловизионное зондирование Земли при решении геологических задач // Георесурсы. 2009. №1(29). С.38–42.
36. Каримов К.М. Авиационное тепловизионное зондирование геологической среды // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. ОАО ВНИИОЭНГ. 2009. № 5. С.24–31.
37. Каримов К.М. Использование тепловизионной томографии геологических сред в военной геофизике. СПб.: ВКА А.Ф.Можайского, 2012. Т.2. С. 203–211.
38. Каримов К.М., Каримова Л.К. Космическое тепловизионное зондирование континентального шельфа морей // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. ОАО ВНИИОЭНГ. 2010. № 2. С. 8–15.
39. Каримов К.М., Каримова Л.К. Дистанционный тепловизионный метод при разведке подземных вод в Испании // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. ОАО ВНИИОЭНГ. 2010. №10. С. 24–31.
40. Каримова Л.К. Тепловизионная томография при изучении импактных кратеров // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. ОАО ВНИИОЭНГ. 2011. №9. С.28–37.
41. Каримова Л.К. Особенности строения импактного кратера MADONA (Латвия) по данным тепловизионного зондирования. Томск: ТПУ, 2012. С. 381–383.

42. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. М.: Логос, 2001. –264 с.
43. Книжников Ю.Ф. Основы аэрокосмических методов исследований. М.: МГУ, 2003. –137 с.
44. Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. –216 с.
45. Константинов М.М. Золоторудные формации мира. М.: 2006. –358 с.
46. Конюхов В.М., Чекалин А.Н. Миграция разноплотностных жидкостей в водоносных пластах сложной структуры. Казань, 2005. –160 с.
47. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. –304 с.
48. Крайнев Ю.Д. Дайковые кимберлиты Лесной Гвинеи. М.: Литосфера, 2009. №3. С.33–46.
49. Кронберг П. Дистанционное излучение земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. М.: Мир, 1988. –343 с.
50. Кучеров В.Г. Синтез сложных углеводородных систем при термобарических условиях, сходных с мантийными // Физическая Химия. 2010. №433(3). С. 361–364.
51. Кутателадзе С. Основы теории теплообмена. М.: 1979. –416 с.
52. Летников Ф.А. Петрология и флюидный режим континентальной литосферы. Новосибирск, 1988. –187 с.
53. Липаев А.А. Теплофизика горных пород нефтяных месторождений. М.: Недра, 2003. –304 с.
54. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. –414 с.
55. Луканин В.Н. Теплотехника. М.: Высшая школа, 2000. –671с.
56. Лутц Б.Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. М.: 1980. –247 с.
57. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: 1965. –369 с.
58. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. –671 с.
59. Масайтис В.Л. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. –231 с.
60. Масайтис В. Попигаевский метеоритный кратер. М.: Наука, 1975. –124 с.

61. Маракушев А.А. Импаكتиты. М.: МГУ, 1981. –240 с.
62. Милашев В. Кимберлиты и глубинная геология. Л.: Недра, 1990. –167 с.
63. Милашев В.А. Режим и факторы образования кимберлитов. СПб., 2003. –112 с.
64. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. –288 с.
65. Нугманова Е.В., Каримов К.М. Магнитотеллурические исследования Татарстана. Немецкая национальная библиотека. 2012. –106 с.
66. Овсянников В.А. Влияние условий наблюдения наземных объектов на их эффективный тепловой контраст. М.: Оптико-механическая промышленность. 1991. № 12. С. 24–26.
67. Основы геодинамического анализа при геологическом картировании М.: МПР РФ, 1997. –519 с.
68. Онегов В.Л., Каримова Л.К. Алгоритмы и программный комплекс построения объемных моделей теплового поля Земли // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. №3(126). С.125–129.
69. Онегов В.Л., Каримова Л.К. Построение объемных моделей теплового поля с использованием вейвлет – преобразования при дистанционном тепловизионном зондировании Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН. 2011. Т.8. №3. С.17–25.
70. Павленкова Н.И. Волновые поля и модели земной коры. Киев: Наукова думка, 1973. –214 с.
71. Паталаха Е.И. Тектонофашии Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1986.
72. Паталаха Е.И. Генетические основы морфологической тектоники. Алма-Ата: Наука, 1981. –180 с.
73. Патент Российской Федерации №2421762. Способ выявления залежей углеводородов. Каримов К.М., М, 2009.
74. Патент Российской Федерации №2428722. Способ дистанционной диагностики магистральных трубопроводов. Каримов К.М., М, 2009.
75. Патент Российской Федерации №2465621. Способ поиска подземных вод. Каримов К.М., М, 2012.

76. Патент Российской Федерации №2556737. Способ тепловизионной диагностики геологической среды (варианты). Каримов К.М., М, 2015.
77. Петрищевский А.М. О гравитационной томографии. М.: Геофизика, 2010. №2. С.71–80.
78. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. СПб.: СПбГУ, 1999. –132 с.
79. Пейве А.В. Эволюция земной коры и мобилизм. М.: 1991. –252 с.
80. Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеиздат. 1984. –207 с.
81. Полный каталог «Импактные структуры Земли» <http://omzg.sgcc.ru/impact/>
82. Претт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. –670 с.
83. Рассел У.Л. Основы нефтяной геологии. Л.: 1958. –619 с.
84. Рачкулик В.И. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. –288 с.
85. Священный Коран. Смысловой перевод с арабского на русский язык. Пер. Кулиева Э. КАЭ.: Издательский комплекс имени Короля Фахда. 2002.
86. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. –264 с.
87. Сонин Г.В. Теплофизические свойства почвогрунтов и температуры нейтрального слоя территории СНГ // Георесурсы. 2001. №1. С. 41–44.
88. Статистика. М.: ИНФРА-М, 1998. –310 с.
89. Столиц Э. Вейвлеты в компьютерной графике. М.: Ижевск, 2002. –272 с.
90. Танана В.П. Решение обратной задачи для уравнения теплопроводности методом установления // Изв. Челябинского научного центра. 2005. №2(28). С.1–3.
91. Терещенко С.А. Метод вычислительной томографии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. –320 с.
92. Тектоника и геодинамика // Планета Земля. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. –652 с.
93. Тектоносфера Средней Азии и Южного Казахстана. Киев: 1990. –232 с.

94. Тихонов А. Н. Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука, 1987. –160 с.
95. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. –735 с.
96. Толчельников Ю. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. –252с.
97. Троицкий И.Н. Статистическая теория томографии. М.: Радио и связь, 1989.
98. Трофимов В.С. Геология месторождений природных алмазов. М.: Недра, 1980. –304 с.
99. Фельдман В.И. Петрология импактитов. М.: МГУ, 1990. –300 с.
100. Христофорова Н.Н. Тепловой режим и оценка перспектив нефтегазоносности Приволжского региона // Георесурсы. 2004. 1(15). С.24–27.
101. Хуторской М.Д. Термотомография: новый метод изучения геотермического поля // Георесурсы. 2005. 2(17). С.19–28.
102. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. М.: Мир, 1983.
103. Чуи К. Введение в вэйлеты. М.: Мир, 2001. –412 с.
104. Электроразведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1989.
105. Шилин Б.В. Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. Л.: 1980. –247 с.
106. Шорин С.Н. Теплопередача. М.: 1964. –490 с.
107. Юдахин Ф.Н. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. –299 с.
108. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: НГТУ, 2003. –104 с.
109. Campos-Enriquez J. O., Chavez-Garcia F. J., Cruz H. Shallow crustal structure of Chicxulub impact crater imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift // Geophysical Journal International. 2004. Vol. 157. № 16. P. 515–525.
110. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. № 5. P. 893–903.

111. Chander G., Markham B.L. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures, and Postcalibration Dynamic Ranges // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. № 41(11). P. 2674–2677.
112. Colby J.D. Topographic normalization in rugged terrain // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1991. 57. P. 531–537.
113. Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. J. Appl. Phys. 1963. 34, P. 2722–2727.
114. COMSOL Multiphysics Simulation Software. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.comsol.com/products/multiphysics>.
115. Dence M. R. Re-examining structural data from impact craters on the Canadian shield in the light of theoretical models. In: Plado J. & Pesonen L. J. eds. Impacts in Precambrian Shields, Springer-Verlag, Berlin. 2002. P. 59–80.
116. Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P-velocity up to degree and order 6. J.Geophys. Res. 1984. vol. 89. P. 5929–5952.
117. Dziewonski A.M. Seismic tomography of the Earth's interior. Amer.Sci. 1984. Vol. 72. N5. P. 483–494.
118. French B. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution N 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998. –120 p.
119. Gordo A. Spatio-temporal patterns in the north-western Mediterranean from MERIS derived chlorophyll a concentration // Scientia Marina. Barcelona. 2008. №72(4). P. 757–767.
120. Griffiths D.H. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. 1993. Geophysics 29. P. 211–226.
121. Jeffrey W. Hedengvist Epithermal gold mineralization. New Zealand. 1988
122. Hounsfield G.N. A method of and apparatus for examinations of a body by radiation such as X-ray or gamma-ray. London, Patent 1283915. –1972.
123. Karimov K.M. Distinctive Structural Features of the Tatarstan Arch According to Geophysical Data // Georesources. 2007. № 2(10). P. 33–36.
124. Kolesnikov A., Kutcherov V.G. Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions. Nature Geoscience, 2009. №2. P. 566–570.

125. Koeberl C. African meteorite impact craters: characteristics and geological importance. *Journal of African Earth Sciences* 18, 1994. P. 263–295.
126. Lubimova E. Heat flow, temperature and electrical conductivity of the crust and upper mantle in USSR // *Tectonophysics*, 1970. V. 10. P. 245–281.
127. Maurello P. Localization of magnetic sources underground by a probability tomography approach: Progress in Electromagnetic Researches M.: 2008. №3. P. 27–56.
128. Masaitis V.L. Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview *Australian Journal of Earth Sciences* 52. 2005. P. 509–528.
129. Melosh H. *Impact cratering: a geologic process*. Oxford University Press. N.-Y.1989. –245 p.
130. MODIS Products Table [Электронный ресурс]. URL: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table
131. Olasehinde A. Analysis of magnetic anomaly over the riruwai younger granite ring complex: a geodynamic implication. *Continental J. Earth Sciences*. 2012. 7 (1). P. 9–18.
132. Pavan Dayaker T.K. Mapping of potential fishing zones using OCM data of IRS-P4 and geographic information system. *Environmental Informatics Archives*. 2003. №1. P. 475–480.
133. Plescia Jeffrey B. Gravity signature of the Teague Ring impact structure, Western Australia. *Geological Society of America Special Papers*. 1999. №339. P.165–175.
134. Sabins F.F. Jr. *Remote sensing: Principles and interpretation*. New York: W.H. Freeman & Co, 1987. –429 p.
135. Scott H.P., Hemley R.J., Mao H. Generation of methane in the Earth's mantle: In situ high pressure–temperature measurements of carbonate reduction. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 2004. №101. P. 14023–14026.
136. Snyder D. B., Hobbs R. W. Deep seismic reflection profiles across the Chicxulub crater // *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II: Proceedings of the International Conference*. The Geological Society of America. 1999. № 339. P. 263–268.

137. Teillet P. M, Guindon B. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // Can. J. Remote Sens. 1982. Vol. 8, P. 84–106.
138. The Landsat-7 Science Data User's Handbook [Электронный ресурс]. URL: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>
139. Tucker C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens. Environ. 1979. Vol.8. №2. P. 127–150.
140. The Landsat-7 Science Data User's Handbook [Электронный ресурс]. URL: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>
141. The ASTER User Handbook [Электронный ресурс]. URL: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/>
142. Teillet P. M, Guindon B., Goodeonugh D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // Can. J. Remote Sens. 1982. Vol. 8. P. 84–106.
143. Radon J. Uber die bestimmung von functionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten // Leipzig: Ber. Verh. Sachs. Akad. Wiss. 1917. 69, P. 262–277.
144. Unsworth M., Campos-Enriquez J.O., Belmonte S. Crustal structure of the Chicxulub Impact Crater imaged with magnetotelluric exploration // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29. №16. P. 351–354.

Научное издание;

Каримов Камиль Мидхатович,
Каримова Ляйля Камильевна,
Гатауллин Карим Рустэмович.

**Тепловизионная томография
геологической среды**

Scientific publication;

Karimov Kamil Midhatovich,
Karimova Lyailya Kamilyevna,
Gataullin Karim Rustemovich.

**Thermovision tomography
Of geological environment**

Компьютерная верстка: Гатауллин И. Р.

ISBN 978-5-9690-0264-7



Подписано в печать 16.11.2015 г.
Формат 70x100 1/6. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 23,38.
Общий тираж 500. Первый завод 50 экз. Заказ ...

Издательство Академии наук Республики Татарстан
420111, РТ, г. Казань, ул. Баумана, 20.

Отпечатано с готового оригинал-макета в
типографии «Orange Key»
г. Казань, ул. Галактионова, 14.
Тел. (843)238-24-49