

УДК 556.382:519.2

© Коллектив авторов

А.М. Фархутдинов, Шанталь де Фуке, М.Ш. Минцаев, С.В. Черкасов

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАТИСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРСПЕКТИВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ХАНКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОД



Точки измерения температуры

Введение

Геостатистические методы в настоящее время используются практически во всех областях наук о Земле. При работе с пространственно-распределенными данными эти методы существенно повышают эффективность анализа и интерпретации информации.

В данной работе геостатистический анализ и оценка данных использованы для уточнения строения продуктивного пласта Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод и распределения температур в его пределах на основе скважинных наблюдений и температурных измерений.

Ханкальское месторождение расположено в Чеченской республике в 10 км к юго-востоку от г. Грозный (рис. 1) и представляет собой многопластовую систему продуктивных слоев, представленных песчаниками чокракского и караганского горизонтов среднего миоцена, переслаивающихся с глинистыми слоями. Месторождение приурочено к юго-восточному погружению Октябрьской антиклинальной структуры, осложненной двумя тектоническими нарушениями. Разработка месторождения активно велась с 1974 по 1994 гг., но в связи с началом войны прекратилась [1]. В 2013 г. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова совместно с членами консорциума «Геотермальные ресурсы» начал проект по строительству экспериментальной геотермальной станции на базе наиболее перспективного XIII пласта Ханкальского месторождения геотермальных вод [2].

В задачи работы входило создание первой 3D модели распределения температуры в пределах Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод, новой структурной карты по кровле XIII пласта и оценка температуры по кровле данного пласта. Геостатистические анализы и оценка производилась в программе ISATIS [3].

Теория и методы

Одним из наиболее применяемых в геостатистике методов является кригинг. Кригинг – это

оптимальная интерполяция на основе минимизации среднеквадратичного отклонения, вид обобщенной линейной регрессии. Метод выполняет две группы задач: количественное определение пространственной структуры данных (или вариограммный анализ) и создание прогноза (оценка). Впервые теоретические основы разработаны почти 60 лет назад французским математиком Ж. Матероном с использованием результатов магистерской диссертации южноафриканского горного инженера Д. Крига, в честь которого и назван метод. Основная идея кригинга – предсказание значения функции в данной точке путем вычисления средневзвешенного значения по известным значениям функции в окрестности точки [4].

В данной работе для интерполяции использовался обычный кригинг (ordinary kriging) и кригинг внутренних случайных функций (intrinsic random functions kriging) для нестационарных данных [5].

Исходные данные

Как геологические наблюдения, так и измерения температуры по стволам скважин месторождения осуществлялись в 1968 и 1988 гг. и отражены в соответствующих отчетах [12, 13]. Измерения осуществлялись после временного прекращения откачки термальных вод для установления температурного равновесия скважина – порода. Всего выполнено около 100 измерений по 14 добывающим скважинам. В результате трагических событий, произошедших на территории Чеченской Республики, паспорта скважин были утрачены, поэтому данные по инклинометрии отсутствуют. Единственной имеющейся информацией, позволяющей оценить положение стволов скважин в пространстве, являются приведенные в фондовых материалах поправки на кривизну скважин, которые достигают 11 м для глубины более 1 км, что означает относительно малый уклон. В связи с этим при проведении геостатистического анализа все скважины рассматривались как вертикальные. Область исследования ограничивалась двумя разломами,



Рис. 1. Обзорная карта расположения Ханкальского месторождения

расположенными на юго-западе и северо-востоке исследуемой территории.

В связи с тем, что Ханкальское месторождение приурочено к Октябрьской антиклинали, к которой относится одноименное нефтяное месторождение, имеется более 100 скважин, вскрывших XIII продуктивный пласт [6]. В исследовании использовались данные структурной карты 1967 г., но в новой интерпретации с при-

менением современных геостатистических методов. Привязка карты осуществлена в программе Quantum GIS, по найденным на территории Ханкальского месторождения скважинам (рис. 2), по точкам автоматически подбирался масштаб карты и производилось ее вращение, использовался метод «тонкой сплайн пластины» («thin plate spline»), т.к. сама карта не имеет атрибутов географической привязки [7].



Рис. 2. Скважины 27-32, 14-т, 5-31 Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод (слева направо)

После оцифровки географически привязанной карты получено 106 точек с альтитудой кровли XIII пласта (рис. 3).

Моделирование и результаты

Для анализа трехмерной структуры температурных данных строилось несколько экспериментальных вариограмм по значениям температуры в 4-х горизонтальных направлениях и одном вертикальном вдоль скважин для $N(h)$ точек, разделенных вектором h по формуле [8]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2. \quad (1)$$

Анализ полученных вариограмм не выявил горизонтальной анизотропии в распределении температур, что позволило ограничиться двумя вариограммами для оценки: горизонтальной и вертикальной.

Для экспериментальных вариограмм подбиралась модель (рис. 4) и, как наиболее подходящая (графически), была выбрана кубическая с действительным радиусом корреляции (range) по оси x и y равной 17965 м, по $z = 2411$ м и плато (sill) равным $3441 \text{ } ^\circ\text{C}^2$.

Для оценки выбранной модели вариограммы и окрестности кригинга (глобальная в случае распределения температур) проводится проверка кросс-валидацией: исходные данные поочередно «стираются» и определяются, затем вычисляется

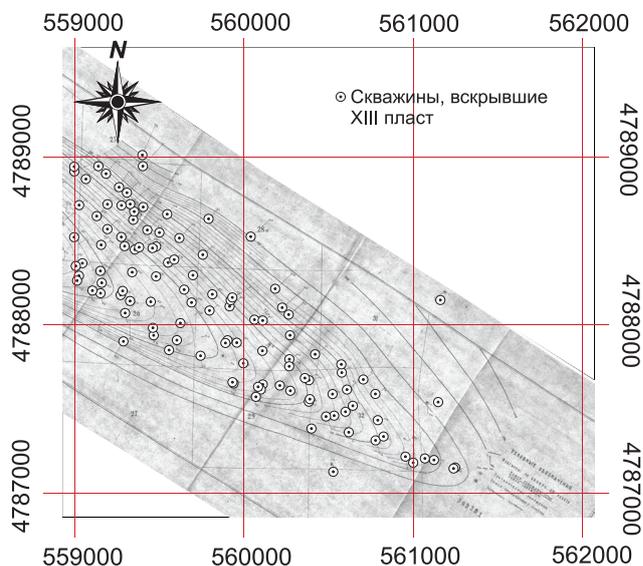
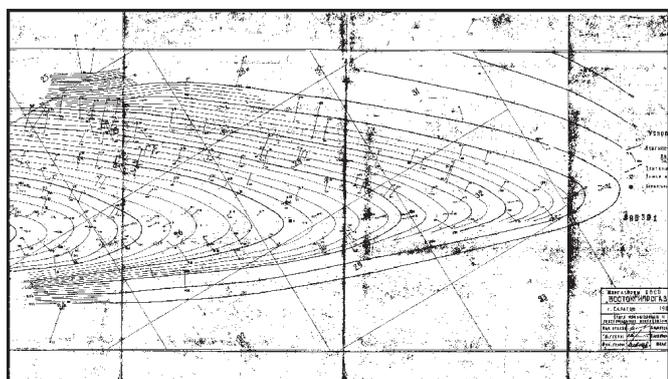


Рис. 3. Структурная карта XIII пласта до (слева) и после (справа) географической привязки и оцифровки

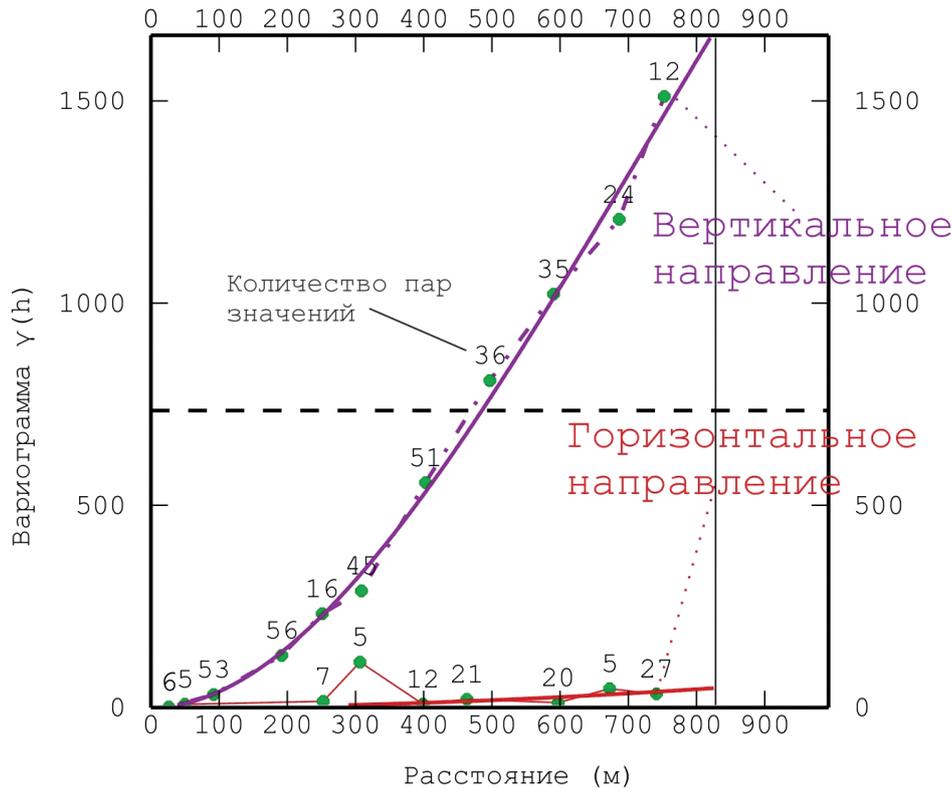


Рис. 4. Экспериментальные вариограммы и подобранные к ним модели

разница между полученным и экспериментальным значениями.

На рис. 5 видно, что выбранная модель дает достаточно точную оценку, с коэффициентом корреляции (ρ) между оцениваемым и изначальным значением равным 0,989.

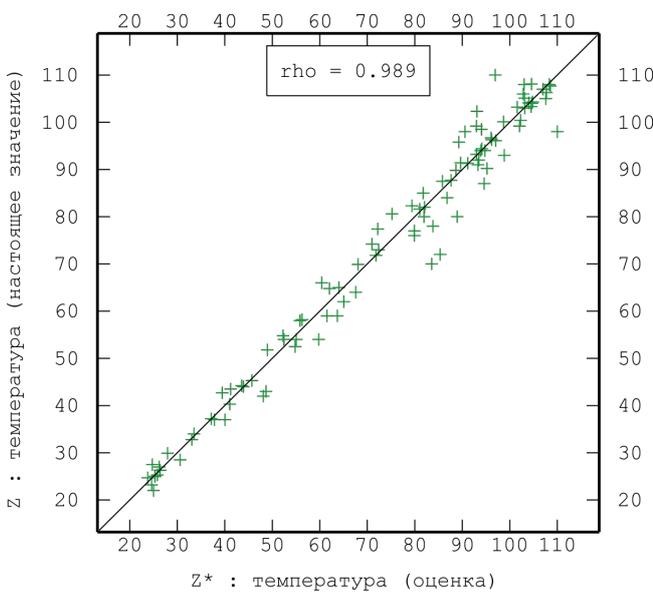


Рис. 5. Кросс-валидация для оценки распределений температуры

Следующим этапом является обычный кригинг (ordinary kriging). В матричной форме:

$$\text{Система кригинга: } \begin{bmatrix} C_{\alpha\beta} & 1 \\ 1' & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\alpha 0} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$\text{Оценка: } Z^* = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ 0 \end{bmatrix}' \times \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \mu \end{bmatrix}.$$

$$\text{Вариация оценки: } \text{Var}(\varepsilon) = C_{00} - \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \mu \end{bmatrix}' \times \begin{bmatrix} C_{\alpha 0} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Где $C_{\alpha\beta}$, $C_{\alpha 0}$, C_{00} – ковариация между точками данных, ковариация между оцениваемой и данной точкой, априорная ковариация соответственно; μ – мультипликатор Лагранжа; Z^* , Z_α – оцениваемая точка, первоначальные данные; λ_α – веса, которые требуется найти при решении системы для последующей оценки.

Полученные результаты температурного распределения отражены на рис. 6.

По отметкам кровли XIII пласта также строилась экспериментальная вариограмма (рис. 7).

В результате вариограммного анализа можно сделать вывод о нестационарности данных (среднее плавно меняется на исследуемой области), т.к. антиклинальная складка погружается в юго-восточном направлении и среднее значение альтитуды кровли пласта на северо-западе меньше среднего значения альтитуды на юго-востоке.

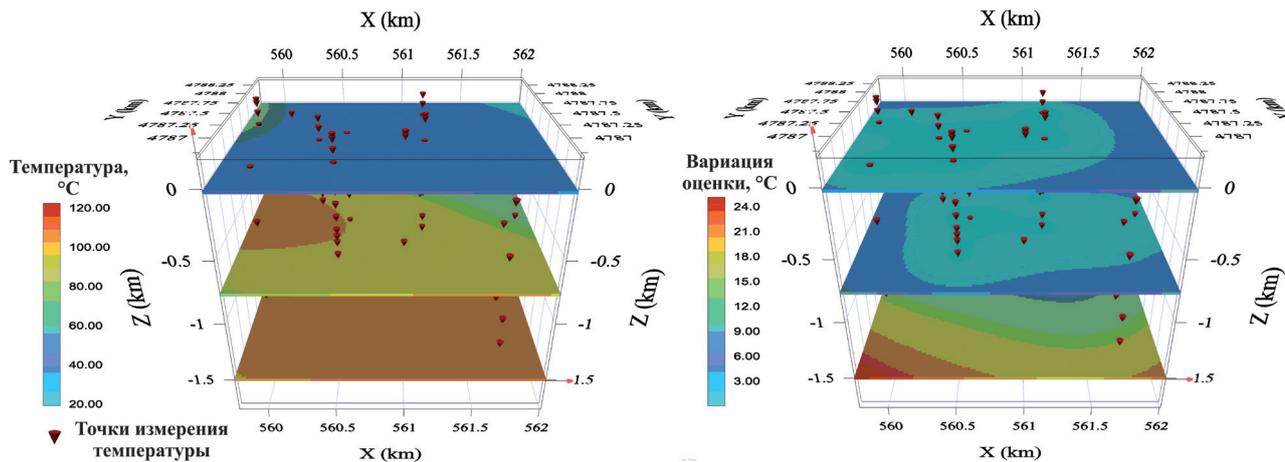


Рис. 6. Оценка распределения температуры (слева) и ее вариация (справа)

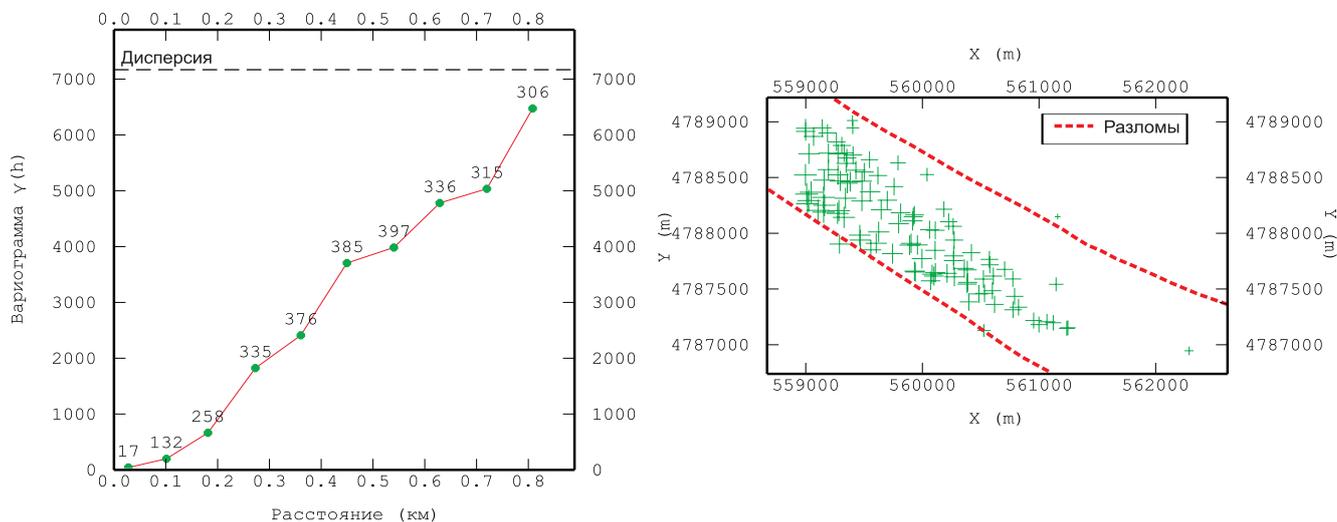


Рис. 7. Вариограмма и данные по абсолютным отметкам кровли XIII пласта

Одним из методов работы с нестационарными данными является метод случайных внутренних функций k -порядка (IRF- k , intrinsic random functions of k -order), разработанный Ж. Матероном (1973). Суть метода состоит в обеспечении квазистационарности данных путем оперирования приращениями k -порядка или, как их называют, авторизованными линейными комбинациями k -порядка ($k=0$ обозначает разницу $Z(x) - Z(x+h)$, $k=1$ приращение приращения и т.д., обычно выбирается порядок не выше 2), использование которых отфильтровывает среднее и его изменение, или тренд, выраженный полиномом $k-1$ порядка в координатах (x в одномерном или x, y в двумерном пространстве). К примеру, в двумерном пространстве для фильтрации линейного тренда $a_0 + a_1x + a_2y$ условиями авторизации является [9]:

$$\sum_i \lambda_i = 0, \sum_i \lambda_i x_i = 0, \sum_i \lambda_i y_i = 0.$$

Для оценки альтиуды кровли XIII пласта используется генерализованная ковариация («generalized covariance»). Для случайной непрерывной внутренней функции k порядка $Z(x)$ существует непрерывная симметричная функция $K(h)$, называемая генерализованной ковариацией, которая для любой пары приращений k порядка $Z(\lambda)$ и $Z(\mu)$ равна [10, 11]:

$$E[Z(\lambda)Z(\mu)] = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda^{\alpha} \mu^{\beta} K(|x_{\alpha} - x_{\beta}|), \quad (2)$$

где $|x_{\alpha} - x_{\beta}|$ обозначает расстояние между двумя точками в R .

IRF- k кригинг можно условно разделить на 3 этапа:

1. Определение тренда.
2. Определение оптимальной генерализованной ковариации.
3. Оценка альтитуды и ее вариация.

Система IRF-к кригинга:
$$\begin{bmatrix} K_{\alpha\beta} & f_{\alpha}^{\ell} \\ f_{\beta}^{\ell} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha} \\ \mu_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\alpha\beta} \\ f_0^{\ell} \end{bmatrix}.$$

Оценка:
$$Z^* = \begin{bmatrix} Z_{\alpha} \\ 0 \end{bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha} \\ \mu_l \end{bmatrix}.$$

Вариация оценки:
$$Var(\varepsilon) = K_{00} - \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha} \\ \mu_l \end{bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} K_{\alpha 0} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Среди нескольких вариантов тренда (табл. 1) методом наименьших квадратов выбран тренд $1 \ x \ y \ x^2 \ x y \ y^2$.

Для выбора оптимальной модели генерализованной ковариации были предложены несколько моделей (табл. 2). Модели расположены по показателю теоретической вариации, деленной на вариацию экспериментальную (чем ближе значение к единице, тем лучшую оценку даст выбранная модель, = 1 идеальный вариант).

Выбранная модель генерализованной ковариации – сферическая с действительным радиусом корреляции (a) 1000 м и плато 236,2. Учитывая

небольшое число известных значений, использовалась глобальная окрестность кригинга как наиболее подходящая. Данные параметры проверялись «кросс-валидацией», которая показала коэффициент корреляции 0,99 (рис. 8).

С использованием подобранной модели и строилась структурная карта XIII пласта. Тектонические нарушения на исследуемой территории играют роль так называемых экранов (значения альтитуды кровли пласта резко меняются по разные стороны разломов и поэтому не могут быть коррелированы), и т.к. имеется всего по одной скважине по разные стороны разломов, оценка на этой территории невозможна (рис. 9).

После получения карты распределения температуры на территории Ханкальского месторождения и структурной карты XIII пласта была произведена оценка температуры по сетке, привязанной к кровле пласта (рис. 10).

Выводы и заключение

Карта распределения температуры XIII пласта с использованием геостатистических методов построена впервые, и она позволяет в зависимости от выбранной территории для продуктивной скважины спрогнозировать температуру воды на выходе, что

Таблица 1

Подбор тренда

Тренд	Средняя ошибка
$1 \ x \ y \ x^2 \ x y \ y^2$	7,116
$1 \ x \ y \ x^2 \ x y \ y^2 \ x^3 \ x^2 y \ x y^2 \ y^3$	11,54
$1 \ x \ y$	42,41
Без тренда	96,11

Таблица 2

Подбор модели генерализованной ковариации

Счет	Эффект самородка	Сферическая	Линейная	Экспоненциальная
	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0, & h \neq 0 \end{cases}$	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \leq a \\ c_0 + c, & h > a \end{cases}$	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{h}{a} \right), & h \leq a \\ c_0 + c, & h > a \end{cases}$	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + (c - c_0) \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a} \right) \right], & h \neq 0 \end{cases}$
1,031	0	236,2	0	0
1,055	0	0	453,2	0
1,166	0	0	0	236,5
1,206	30,8	0	0	216,6

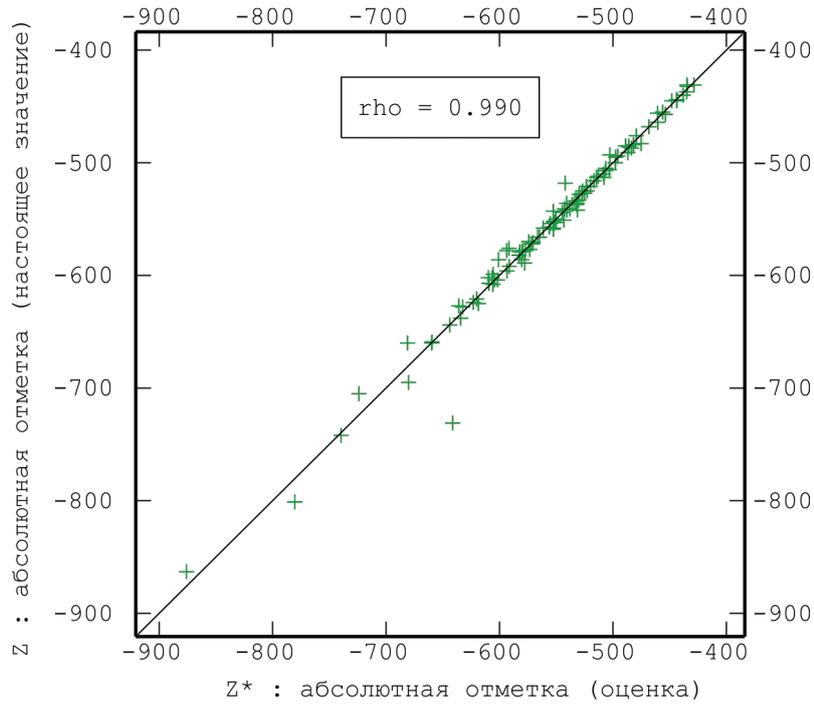


Рис. 8. Кросс-валидация выбранных параметров для оценки абсолютной отметки XIII пласта

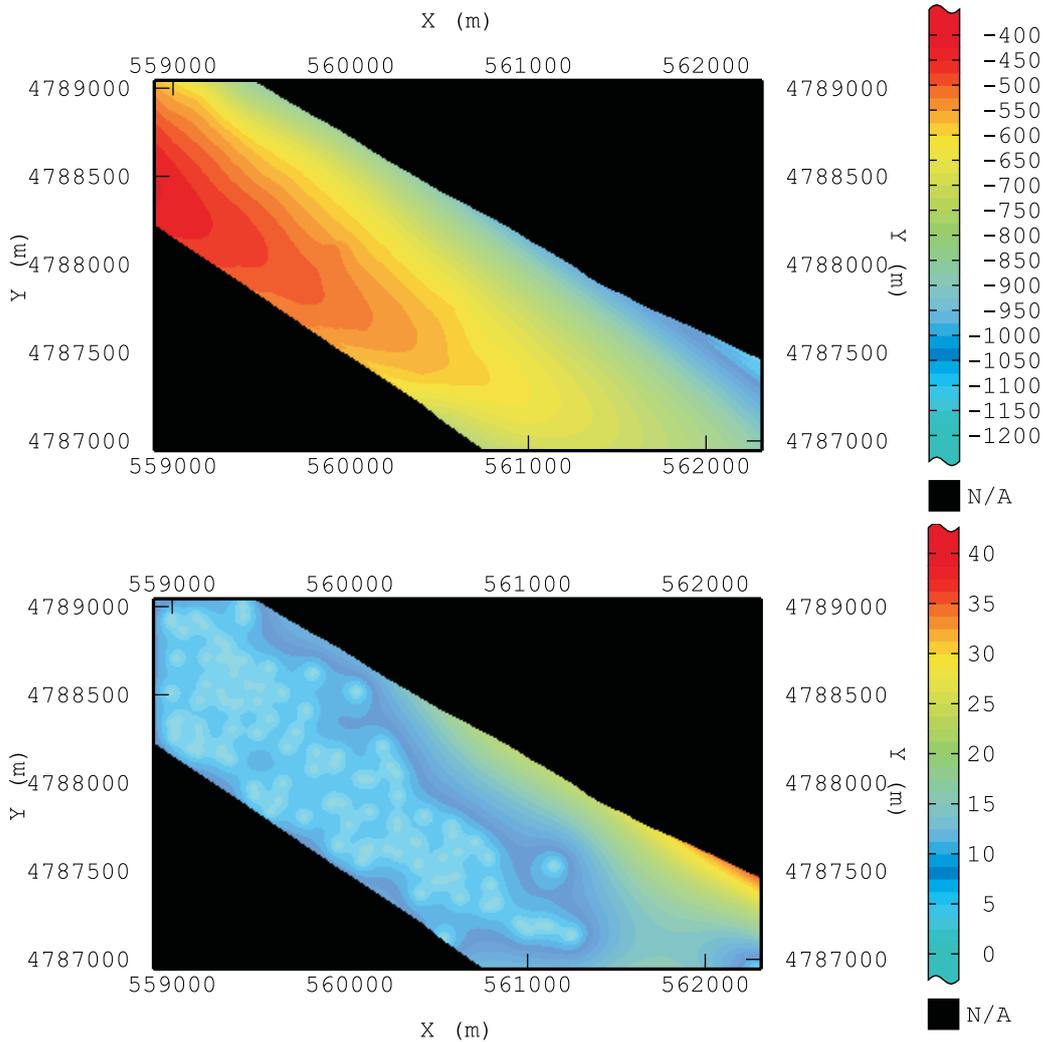


Рис. 9. Оценка (сверху) и вариация оценки (снизу) абсолютных отметок кровли XIII пласта

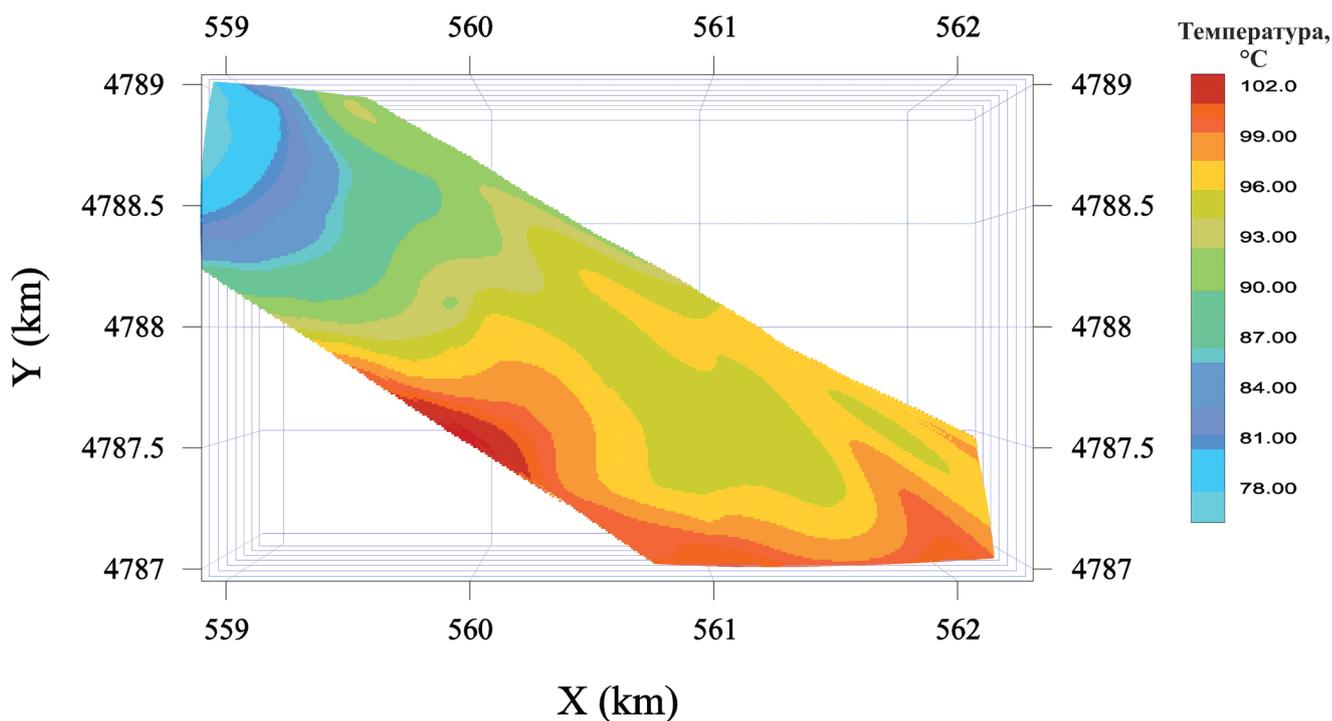
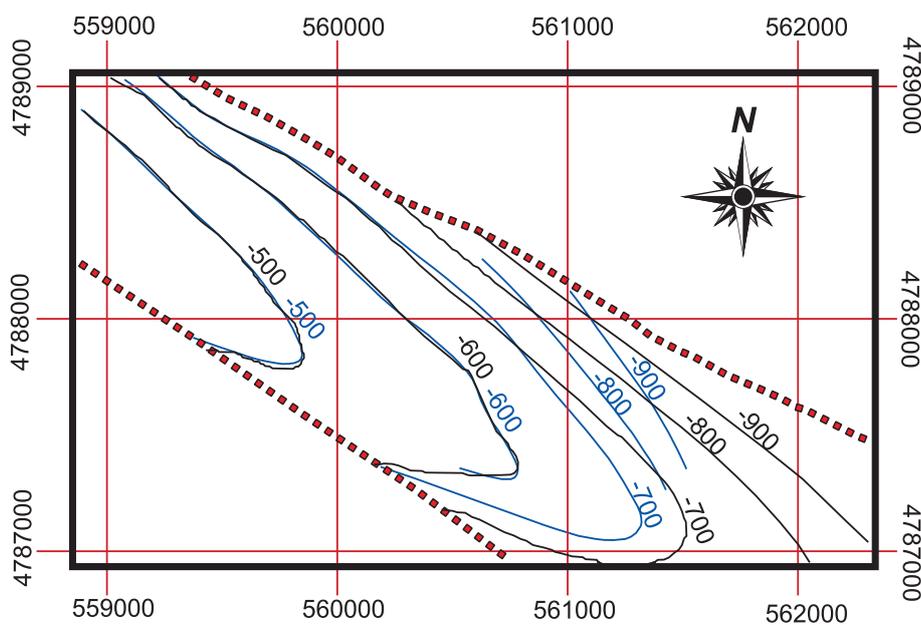


Рис. 10. Оценка распределения температуры по кровле XIII пласта Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод

совместно с дебитом дает важную информацию по потенциальной мощности будущей геотермальной станции.

При создании структурной карты в 1967 г. применялся распространенный метод триангуляции, когда по замеренным точкам обрисовываются

треугольники, затем на каждой линии по правилу линейной интерполяции находят точки со значениями абсолютных отметок. В новой геостатистической интерпретации учитываются все данные в окрестности точки, что дает более точную оценку (рис. 11).



Изолинии по кровле XIII пласта Ханкальского месторождения:

- В новой интерпретации
- По структурной карте 1967 г.
- Разломы

Рис. 11. Сравнение двух структурных карт кровли XIII пласта

Следует отметить, что при хорошо совпадающих конфигурациях кровли пласта на картах 1967 и 2014 гг. на северо-западе исследуемой территории в юго-восточной части расхождения по глубине превышают 100 м.

Такое расхождение является существенным при выборе положения скважин, тем более, что именно южная часть, по результатам анализа температур, является перспективной для разработки XIII пласта Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, договор № 02.G25.31.0056.

Ключевые слова: теплоэнергетические воды, моделирование, геостатистика, кригинг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Исмагилов Р.А. История открытия и разработки Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Том 19. – № 1. – С. 93-96.
2. Гареев А.М., Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В. Современное состояние и перспективы использования теплоэнергетических вод Российской Федерации (на примере Ханкальского месторождения) // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Том 19. – № 3. – С. 887-892.
3. Géovariations, Isatis Technical Ref., ver. 9.06. Geovariations & Ecole Des Mines De Paris: Avon Cedex, France, 2009.
4. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М.: Мир, 1968. – 460 с.
5. Chile J.-P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, Wiley Series in Probability and Statistics. – New York: John Wiley & Sons. Inc, 1999. – 695 p.
6. Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Исмагилов Р.А., Черкасов С.В. Перспективы использования геотермальных вод в Предкавказской предгорной зоне (Ханкальское месторождение) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Том 19. – № 4. С. 34-43.
7. QGIS Development Team, QGIS 1.8.0 Geographic Information System User Guide. Open Source Geospatial Foundation Project, 2013. – URL: <http://docs.qgis.org/1.8/pdf/QGIS-1.8-UserGuide-en.pdf> (дата обращения: 04.10.2014).
8. Демьянов В., Савельева Е.. Геостатистика. Теория и практика. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
9. Geostatistics for Fish Survey Data / Armstrong M., Renard D., Rivoirard J., Petitgas P. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 1992. – URL: http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ARMSTRONG_Cours_00375.pdf (дата обращения: 24.10.2014).
10. Cressie N. Statistics for Spatial Data. – New York: John Wiley & Sons., 1991. – 900 p.
11. Kanevski M. et al. Geostatistical Assessment Of Post-Chernobyl Soil Pollution In Briansk Highly Polluted Area, Russia. In Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science, Montpellier (France), August 1998. – URL: <http://natres.psu.ac.th/Link/SoilCongress/bdd/symp25/2505-t.pdf> (дата обращения: 04.11.2014).
12. Шпак А.А. Отчет по подсчету эксплуатационных запасов термальных вод месторождения Ханкальская долина ЧИАССР (для теплоснабжения и горячего водоснабжения) по состоянию на 1 января 1968 года. – 1968. – Т. 1. – 352 с.
13. Крылов В.Б. Комплексные исследования скважин и оценка эксплуатационных запасов термоэнергетических подземных вод в условиях геотермальной циркуляционной системы на Ханкальском месторождении ЧИАССР. – 1988. – 128 с.