
**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 528.94.942

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ДИАГРАММЫ СКВАЖИН
КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА БАЗЫ ДАННЫХ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ**

© 2015 г. О. К. Миронов

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: geoinf@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 16.06.2014 г.

Показано применение корреляционных диаграмм для анализа информации базы данных изыскательских скважин с целью проверки соответствия ее содержимого теоретическим представлениям о геологическом строении изучаемого объекта. В результате могут быть обнаружены особенности геологического строения или ошибки в исходной информации.

Ключевые слова: корреляции, база данных скважин, эрозионный врез, корреляционная диаграмма.

За последнее время появляется все больше геологических исследований, основанных на повторном использовании ранее собранных данных. Крупнейший проект, при реализации которого был применен такой подход, – геологическое картографирование Москвы в масштабе 1:10000 [7] (далее – Московский проект).

При использовании архивных данных следует иметь в виду, что в большинстве случаев они собирались не для той задачи, которую планируется решать в текущий момент, поэтому требуется их тщательная дополнительная проверка. При смене информационной модели, например, при изменении масштаба исследований, может потребоваться новая интерпретация данных, которая может быть выполнена различными способами и, в свою очередь, нуждается в верификации.

Для крупномасштабных исследований основной объем в базе данных исходной информации составляют описания колонок изыскательских скважин. Непосредственная “поточечная” проверка первичных данных и их интерпретация весьма трудоемки и не могут обеспечить должного качества. При анализе геологической информации необходимо сопоставление информации многих выборок из близко расположенных точек отбора данных, что еще более затрудняет ручную обработку.

Проверки тесно связаны с поиском особенностей геологического строения. Всякое отклонение данных от общих закономерностей в изучаемой

области должно быть объяснено одним из четырех возможных способов:

- наличие предусмотренной теорией особенности геологического строения,
- случайное отклонение данных,
- техническая ошибка при обработке исходных данных,
- неправильная интерпретация первичных данных.

Большой объем хранящейся в базах данных геологической информации предопределяет необходимость применения автоматических (компьютерных) методов анализа, которые повышают эффективность проверок и сокращают трудозатраты.

Настоящая работа описывает применение корреляционных диаграмм изыскательских скважин для анализа базы первичных данных Московского проекта [5–7].

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СВОЙСТВА
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ДИАГРАММЫ
СКВАЖИН**

Корреляционные диаграммы [2] строятся для пары скважин, в которых можно проследить присутствие нескольких общих слоев. Под слоем далее понимается геологически однородное тело, имеющее площадное распространение. В зави-

симости от масштаба исследований слои могут выделяться на основе стратиграфического деления (мелкий масштаб), литолого-стратиграфического деления (средний масштаб), разбиения на инженерно-геологические элементы (крупный масштаб). Большинство примеров, в которых в соседних скважинах прослеживается слоистое геологическое строение и, следовательно, применимы описанные ниже методы, относятся к мелкому масштабу.

Территория Москвы находится в центре Русской равнины, для которой характерен плавный процесс осадконакопления. Разрывные нарушения в мезозойских и каменноугольных отложениях на территории Москвы отсутствуют [7]. В этих условиях правомерно предположение о изначально параллельном (рис. 1а) или веерном (рис. 1б) расположении слоев коренных отложений в изыскательских скважинах. В обоих этих случаях мощности одноименных слоев в скважинах пропорциональны. Генетически такое соотношение мощностей обосновывается следующими предположениями:

1. В процессе образования осадочной толщи скорости осадконакопления одноименных слоев в точках бурения скважин были равны (параллельное залегание) или пропорциональны (веерное залегание).

2. После завершения осадконакопления между точками бурения скважин не было разрывных нарушений, а в самих точках не было размывов.

3. Тектонические движения после завершения процесса осадконакопления на рассматриваемой территории происходили синхронно.

Корреляционная диаграмма для пары колонок скважин строится следующим образом [2]. На координатной плоскости (X, Y) каждому общему для обеих скважин слою ставится в соответствие точка с координатами (x, y), где x – абсолютная отметка кровли слоя в 1-й скважине, y – абсолютная отметка кровли слоя во 2-й скважине. Отметки кровли слоев, которые встречаются только в одной скважине, на диаграмме отображаются как вертикальные или горизонтальные прямые (см. рис. 2).

При соблюдении сделанных выше предположений о характере залегания слоев точки на корреляционной диаграмме должны располагаться на прямой линии. Случайные отклонения расположения точек от прямой объясняются местными особенностями и должны быть незначительны.

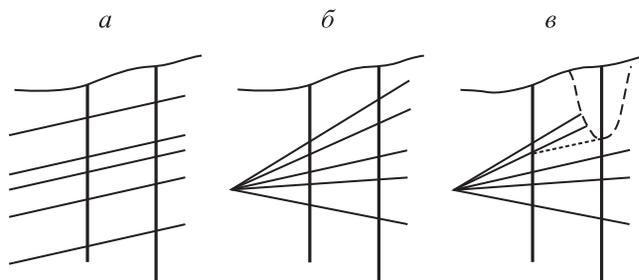


Рис. 1. Варианты расположения слоев в скважинах: а – параллельное залегание, б – веерное залегание, в – в районе погребенного эрозионного вреза.

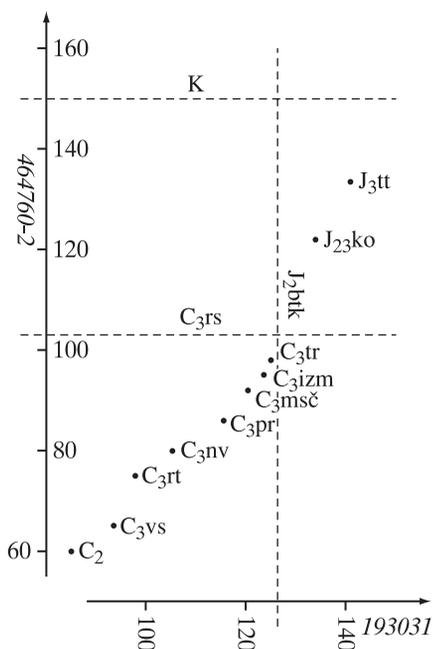


Рис. 2. Корреляционная диаграмма скважин 193031 и 464760-2.

Основные известные особенности геологического строения на территории Москвы – наличие погребенных эрозионных врезов [3] (рис. 1в). Как видно из рисунка, если одна из скважин попадает в погребенный эрозионный врез, то мощности всех слоев, кроме самого верхнего, остаются пропорциональными, и соответствующие им точки на корреляционной диаграмме будут лежать на одной прямой, в то время как точка, соответствующая верхнему слою, должна существенно от этой прямой отклоняться. В этом случае все лежащие выше слои в этой скважине также отсутствуют.

Исходя из этих теоретических представлений, методика использования корреляционных диаграмм для анализа информации базы данных скважин Московского проекта выглядит следующим образом. Для каждой пары скважин (для которых число общих слоев коренных отложений

более двух) рассчитывается отклонение множества точек корреляционной диаграммы от прямой. В тех случаях, когда это отклонение значительно, следует найти его объяснение. Для проверки наличия погребенного эрозионного вреза, в частности, надо проверить, верно ли, что все точки, кроме самой *верхней*, лежат на одной прямой. Остальные случаи значительного отклонения, как правило, объясняются “человеческим фактором”, т.е. ошибками ввода или интерпретации первичных данных.

Для определения отклонения множества точек от прямой необходимо ввести числовую меру этого отклонения. В качестве одного из вариантов можно использовать обычный коэффициент корреляции

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{o=1}^n x_i \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

между координатами (x , y) точек на диаграмме (n – число точек на диаграмме).

Другой мерой отклонения может служить эксцентриситет эллипса рассеивания в методе главных компонент [1]. Напомним, что в двумерном евклидовом пространстве для заданного множества точек можно провести две взаимно перпендикулярные прямые (главные компоненты) так, что суммарный квадратический разброс проекций точек на первую прямую принимает максимальное, а на вторую – минимальное значение для всех возможных прямых.

Приведем конкретные формулы. Для центрированного множества из n точек (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, $\sum_{i=1}^n x_i = 0$, $\sum_{i=1}^n y_i = 0$, положим $A = \sum_{i=1}^n x_i^2$,

$$B = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad C = \sum_{i=1}^n y_i^2. \quad \text{Тогда направления главных компонент суть собственные векторы матрицы } \begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix},$$

а среднеквадратический разброс проекций на них пропорционален соответствующим собственным значениям λ_1, λ_2 этой матрицы. Предполагая, что $\lambda_1 > \lambda_2$, будем оценивать приближение множества точек к первой главной компоненте величиной эксцентриситета эллипса рассеивания $e = (\lambda_1 - \lambda_2) / \lambda_1$. Эксцентриситет e принимает значения от 0 до 1, при этом значение 1 соответствует множеству точек, лежащих на одной прямой (эллипс вырождается в отрезок), а 0 – невозможности выбрать одно оптимальное направление (эллипс является окружностью).

В отличие от коэффициента корреляции эксцентриситет допускает геометрическую интерпретацию. Как будет показано ниже, обе “меры прямолинейности” дают аналогичные результаты.

Для выделения погребенных эрозионных врезом целесообразно рассчитывать два значения меры прямолинейности: для всех слоев и для всех слоев, кроме верхнего. Существенные различия в их значениях интерпретируются в пользу близкого нахождения эрозионного вреза.

Высказанные теоретические представления носят пока эвристический характер, т.е. описывают в некотором смысле целесообразные операции с данными. Какая-либо “естественная” гипотеза о генеральной совокупности, из которой проводится выборка скважин, отсутствует, поэтому математико-статистический анализ данных не имеет достаточных оснований. Следует отметить, что данные на корреляционной диаграмме заведомо скоррелированы (большим значениям x соответствуют большие значения y), поэтому следует ожидать близких к 1 значений коэффициента корреляции.

ПРИЛОЖЕНИЯ К МОСКОВСКОМУ ПРОЕКТУ

В книге [2] метод корреляционных диаграмм применяется к корреляции нефтеносных скважин. Фактический материал характеризуется большой глубиной скважин, значительными расстояниями между скважинами и наличием разрывных нарушений. В рассмотренном ниже примере базы данных Московского проекта рассматриваются результаты инженерно-геологических изысканий в черте города. Расстояния между скважинами незначительны, общее число скважин велико, разрывных нарушений нет. Применение корреляционных диаграмм демонстрируется на примере коренных отложений.

Используется следующая стратиграфическая шкала, принятая при составлении геологических карт дочетвертичных и каменноугольных отложений Москвы масштаба 1:10000 [4]:

1. Нерасчлененные меловые отложения (К).
2. Три яруса юрских отложений: нерасчлененные титонские (J_3tt), келловей-оксфордские ($J_{2-3}k-o$), бат-келловейские (J_2bt-k).
3. Подсвиты (толщи) верхнекаменноугольных отложений: русавкинская (C_3rs), трошковская (C_3tr), измайловская (C_3izm), мещеринская ($C_3ms\check{c}$), перхуровская (C_3pr), неверовская (C_3nv), ратмировская (C_3rt), воскресенская (C_3vs).

Таблица 1. Распределение значений коэффициента корреляции

Значения	Число пар	%
0.95 – 1.00	67516	84.5
0.90 – 0.95	8142	10.2
0.85 – 0.90	2466	3.1
0.80 – 0.85	961	1.2
0.45 – 0.80	777	1.0

4. Нерасчлененные (вследствие отсутствия маркирующего горизонта) отложения суворовской свиты верхнекаменноугольных отложений и отложения среднекаменноугольного возраста (C_2).

На рис. 2 показана корреляционная диаграмма двух скважин, в которых наиболее полно представлены все перечисленные отложения: скважина 193031 (абсолютные отметки откладываются по оси X) и скважина 464760-2 (абсолютные отметки откладываются по оси Y). Расстояние между скважинами – 10.13 км. Каждому из перечисленных выше слоев, отмеченных в обеих скважинах, сопоставлена точка на координатной плоскости (X, Y), подписанная соответствующим стратиграфическим индексом. Координата X для этой точки равна абсолютной отметке кровли слоя в скважине 193031, координата Y – абсолютной отметке кровли слоя в скважине 464760-2. Горизонтальными пунктирными прямыми на диаграмме показаны отметки кровли меловых (K) и русавкинских (C_{3rs}) отложений в скважине 464760-2, отсутствующих в скважине 193031. Вертикальной пунктирной прямой на диаграмме показана отметка кровли бат-келловейских (J_{2bt-k}) отложений в скважине 193031, отсутствующих в скважине 464760-2.

Вычисленные значения мер согласованности для этой диаграммы: коэффициент корреляции $k = 0.962$, эксцентриситет $e = 0.982$. Близость этих величин к единице естественно вытекает из согласованной упорядоченности отметок. Тем не менее на диаграмме прослеживаются 2 периода, в которые процесс осадконакопления был согласован, но определялся различными параметрами: $C_{3nv} - C_{3rg}$; $C_{3msc} - C_{3izm}$.

Этот пример показывает, что, во-первых, значения мер согласованности даже для визуально заметных отклонений в корреляционной диаграмме близки к 1, во-вторых, для анализа этих отклонений существенны сотые доли этих значений.

Для проверки описанной выше методики были выбраны более 3000 скважин, вскрывших более

двух указанных выше слоев, и рассчитаны коэффициенты корреляции для тех пар из них, которые находятся на расстоянии менее 1.5 км друг от друга. Распределение значений коэффициента корреляции приведено в табл. 1.

При детальном анализе данных оказалось, что значения коэффициента корреляции, меньшие, чем 0.6, объясняются грубыми ошибками в исходных данных (нарушением порядка следования слоев в описании скважины). Для дальнейшего анализа представляют интерес значения менее 0.95.

Приведем два примера интерпретации данных корреляционных диаграмм.

На рис. 3 показано расположение двух скважин вблизи погребенных эрозионных врезов, а на рис. 4 – их корреляционная диаграмма.

Значения критериев для этой пары скважин равны $k = 0.898$, $e = 0.952$. Видно, что отметка кровли слоя C_{3rt} в скважине 113459 ниже, чем

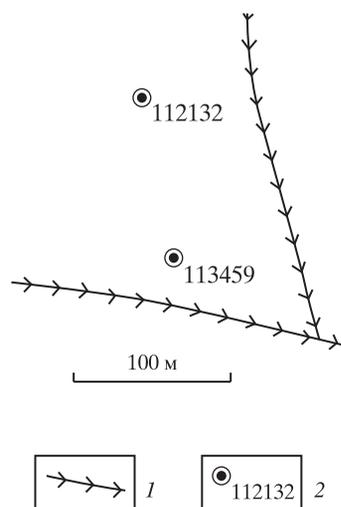


Рис. 3. Фрагмент карты фактического материала: 1 – тальвег погребенного доледникового вреза, 2 – скважина и ее номер.

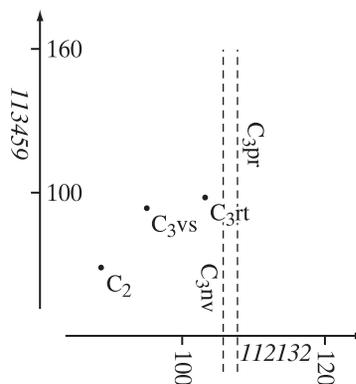


Рис. 4. Корреляционная диаграмма скважин 112132 и 113459.

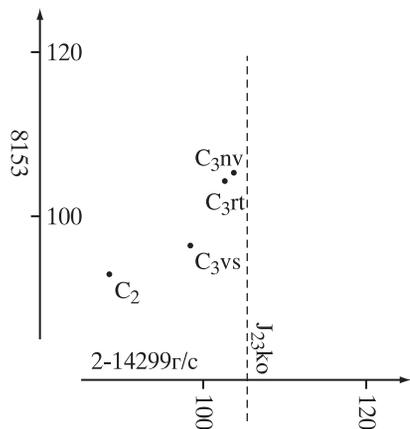


Рис. 5. Корреляционная диаграмма скважин 2-14299г/с и 8153.

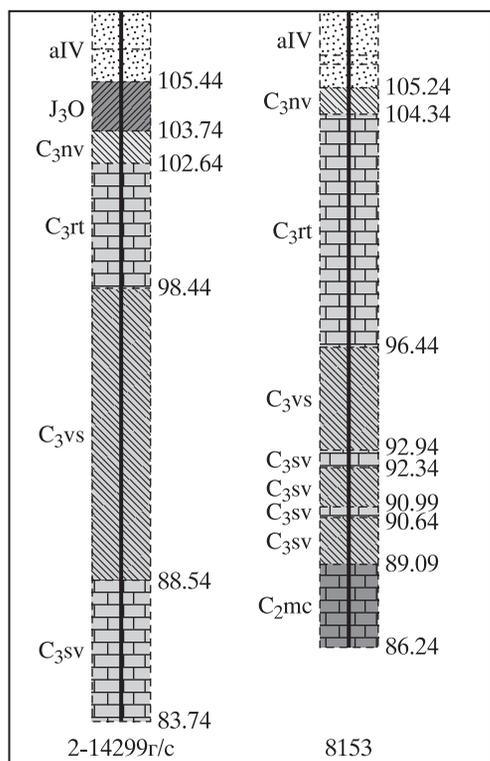


Рис. 6. Колонки скважин 2-14299г/с и 8153, соотношение вертикального и горизонтального масштабов 1:1.

Таблица 2. Сравнение распределения минимальных коэффициентов корреляции для различных расположений скважин

Значения	Все скважины		Скважины в зонах погребенных врезов	
	Число	%	Число	%
0.95 – 1.00	1492	48.6	98	42.6
0.90 – 0.95	882	28.7	68	29.6
0.85 – 0.90	377	12.3	38	16.5
0.80 – 0.85	175	5.7	21	9.1
0.45 – 0.80	145	4.7	5	2.2
Всего	3071	100.0	230	100.0

можно бы ожидать по линейной экстраполяции отметок лежащих ниже слоев. Кроме того, в этой скважине отсутствуют слои C₃nv и C₃rg, отмеченные в скважине 112132. Таким образом, по этой диаграмме можно сделать вывод о близости скважины 113459 к тальвегу погребенного эрозионного вреза, что и показано на рис. 3. Этот пример подтверждает высказанные ранее теоретические соображения о возможности выделения погребенных эрозионных врезов по корреляционным диаграммам.

Следующий пример относится к выявлению ошибок в интерпретации данных. Скважины 8153 и 2-14299г/с находятся на расстоянии 7.8 м друг от друга, рассчитанные меры согласованности для них суть $k = 0.927$, $e = 0.963$. Корреляционная диаграмма приведена на рис. 5, изображение колонок скважин на разрезе – на рис. 6.

На корреляционной диаграмме точка, соответствующая кровле воскресенских глин C₃vs, существенно отклоняется от прямой, проходящей через остальные точки. На рис. 6 видно, что при описании колонки скважины 60-сантиметровой прослой известняков на отметке 92.94 м в скважине 8153 принят за маркер горизонта C₃sv. По-видимому, в действительности тонкие прослой известняков в скважине 8153 следует датировать тем же возрастом C₃vs, что и окружающие их глины. После замены отметки кровли слоя C₂ в скважине 8153 с 92.94 м на 89.09 м значение коэффициента корреляции этих скважин меняется с 0.927 на 0.976.

Исходя из теоретических соображений, для скважин, находящихся вблизи погребенных эрозионных врезов, следует ожидать меньших значений коэффициента корреляции с соседними скважинами. Статистическая проверка этого тезиса была проведена следующим образом. Были отобраны 230 скважин, находящихся на расстоянии менее 50 м от тальвегов погребенных эрозионных врезов. Затем для каждой из этих скважин был рассчитан минимальный коэффициент корреляции со скважинами, находящимися от нее на расстоянии менее 500 м. Аналогичный расчет был проведен для остальных скважин (исключая 230 отобранных). Результаты приведены в табл. 2.

Видно, что для скважин, расположенных в зонах погребенных долин, характерен увеличенный процент значений коэффициента корреляции, меньших 0.9. Это свидетельствует в пользу теоретических представлений о применимости корреляционных диаграмм для обнаружения особенностей геологического строения.

ВЫВОДЫ

Приведенные примеры показывают действенность предлагаемого метода. В настоящее время корреляционные диаграммы систематически используются для контроля информации базы данных скважин Московского проекта. В большинстве случаев найденные отклонения от прямолинейности расположения точек на диаграммах были интерпретированы как ошибки при вводе или интерпретации исходных данных.

Простота исходных положений и реализации предложенного метода делает возможным его применение и для других территорий и масштабов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 608 с.
2. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. М.: Недра, 1987. 268 с.
3. Кутепов В.М., Осипов В.И., Кожеевникова И.А., Козлякова И.В. Районирование территории Москвы по геологическому строению и условиям взаимодействия водоносных горизонтов с учетом распространения древних эрозионных врезов // Геоэкология. 1999. № 5. С. 472–479.
4. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Ерёмкина О.Н., Кожеевникова И.А., Козлякова И.В. Карта дочетвертичных отложений как основа крупномасштабного геологического картирования территории г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 5. С. 399–410.
5. Миронов О.К. Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 200–216.
6. Миронов О.К., Викторов А.А., Фесель К.И. О проблемах ведения баз данных фондовой информации // Геоэкология. 2011. № 5. С. 455–464.
7. Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 195–197.

BOREHOLE CORRELATION AS A TOOL OF DATABASE ANALYSIS

O. K. Mironov

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: geoinf@geoenv.ru*

Borehole correlation diagrams are used for database analysis. Each point at the correlation diagram between two boreholes corresponds to their common layer. Under undisturbed conditions, these points lie close to a straight line. The local fluctuations should be insignificant. Substantial deviations from a straight line may be explained by either the presence of some geological anomaly (fault, buried erosion valley etc.), data error, or misinterpretation. The method is applied for the analysis of Moscow boreholes database.

Keywords: *correlation, borehole database, erosion valley, correlation diagram.*