

УДК 662.51: 556.3

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШАХТНЫХ ВОД

Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С.

*Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
Новочеркасск, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

Закономерности формирования и генезис химического состава шахтных вод Восточного Донбасса выявлены и описаны за период в сто лет. Четыре главных направления изменений состава шахтных вод определены с помощью корреляционно-регрессионного анализа и G-метода классификации многомерных наблюдений. Кислые сульфатные шахтные воды формируются по первому гидрогеохимическому направлению. Второе направление изменения состава шахтных вод приводит к формированию хлоридно-сульфатных шахтных вод. В третьем гидрогеохимическом направлении усиливается роль хлоридных ионов, воды становятся сульфатно-хлоридными за счет притока хлоридных подземных вод. По четвертому направлению формируются оригинальные содовые шахтные воды, происхождение которых связано с притоком в горные выработки подземных вод содового типа. Основные процессы, определяющие генезис химического состава вод, охарактеризованы для каждого периода: окисление сульфидов, растворение сульфатов, приток минерализованных хлоридных натриевых или содовых подземных вод. Всё это ведёт в дальнейшем к значительному увеличению минерализации, снижению pH шахтных вод и резкому росту загрязнения подземных и поверхностных вод, что требует планирования и реализации действенных реабилитационных мер.

Ключевые слова: Восточный Донбасс, химический состав, шахтные и грунтовые воды

APPLICATION OF CORRELATION ANALYSIS TO STUDY THE REGULARITIES OF FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINE WATER

Gavrishin A.I., Borisova V.E., Toropova E.S.

Platov South-Russian State Polytechnical University, Novocherkassk, e-mail: agavrishin@rambler.ru

Patterns of formation and genesis of the chemical composition of mine waters East of Donbass identified and documented over a period of a hundred years. Four main directions of changes in the composition of mine waters are defined by using correlation and regression analysis and G-classification methods of multivariate observations. Acidic sulphate mine waters are first hydrogeochemical direction. The second direction of changes in the composition of mine water leads to the formation of chloride-sulphate mine waters. In the third hydrogeochemical direction towards the role of chloride ions, water become sulphate-chloride due to the inflow of groundwater chloride. The fourth direction formed the original soda mine waters, whose origin is associated with the influx in mining underground water soda type. The key processes that determine the genesis of water chemistry are described for each period: oxidation of sulfides, dissolving sulfates, the influx of mineralized chloride sodium or sodium groundwater. All this leads to a significant increase in future mineralization, decreased pH mine water and a sharp increase in pollution of groundwater and surface water, which require effective planning and implementation of rehabilitation measures.

Keywords: Eastern Donbass, chemical composition, mine waters, groundwaters

Длительное функционирование в Восточном Донбассе угледобывающего и углеперерабатывающего комплексов привело к многочисленным негативным последствиям в состоянии окружающей среды. Произошло интенсивное загрязнение поверхностных вод и атмосферы, изменение режима и баланса подземных вод, трансформация химического состава природных вод с образованием минерализованных шахтных вод. Реструктуризация угольной промышленности и массовое закрытие угольных шахт в регионе еще более интенсифицировали многие негативные процессы: оседание земной поверхности и деформацию горных пород, подтопление территорий и породных отвалов, формирование аномальных по составу шахтных вод, загрязнение подземных и поверхностных, выделение «мертво-

го воздуха» и многие другие отрицательные явления. Все эти негативные факторы вызвали многочисленные деформации и разрушение сооружений, производственных и жилых зданий. Возникла необходимость выявления и описания закономерностей и генезиса формирования химического состава шахтных вод.

Материалы и методы исследований

Для изучения закономерностей изменения химического состава шахтных вод в данной работе привлечены стандартные статистические методы корреляционного и регрессионного анализов [1–3, 6]. Обобщение выполнено по результатам анализа состава шахтных вод за столетний период, с использованием ранее проведенных исследований [2–5]. Выделение основных направлений изменения состава вод произведено с помощью G-метода классификации многомерных наблюдений по программе АГАТ-2 [1–5].

При анализе данных использованы названия типов по классификации О.А. Алекина. В название вод по химическому составу включаются компоненты с содержанием $\geq 25\%$ -моль, располагаются в порядке возрастания содержаний.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ закономерностей формирования химического состава шахтных вод Восточного Донбасса выполнен по результатам обобщения более 1500 анализов вод за столетний период (табл. 1). Изменение состава вод и минерализации (М) носит волнообразный характер, и образование этих изменений хорошо прослеживается по результатам анализа взаимосвязей между компонентами, что позволяет выявить генетические особенности формирования состава вод в различные периоды.

На первом этапе исследований с помощью G-метода многомерного классификационного моделирования выделено четыре главных направления изменения химиче-

ского состава шахтных вод [4], средний состав которых приведен в табл. 2.

Наиболее наглядно особенности выделенных гидрогеохимических направлений формирования состава шахтных вод видны по среднему составу, по коэффициентам корреляции и уравнениям регрессии по минерализации (табл. 3).

Обнаружены следующие закономерности в изменении силы связей содержаний компонентов с минерализацией (табл. 3): связь HCO_3 изменяется от первого направления к четвертому с отрицательной ($r = -0,71$) до положительной (0,62); связь SO_4 уменьшается от первого направления (0,94) к четвертому (0,32) и наклон линии регрессии соответственно снижается (угловой коэффициент от 0,8 до 0,2); связь Cl с минерализацией растет от первого (-0,2) направления к третьему (0,92) и соответственно увеличивается наклон линии регрессии (коэффициент от 0,0 до 0,34); для Ca отмечается слабая связь в первом

Таблица 1

Средний химический состав шахтных вод (мг/л и %-моли)

Период	pH	HCO_3	SO_4	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	М
1920-е годы	6,9	199	1443	397	233	184	405	—	2860
		7	68	25	26	35	39		
1940-е годы	4,4	25	2590	257	304	219	642	—	4040
		1	88	11	25	30	45		
1950-е годы	5,2	221	2795	443	330	191	964	—	4947
		5	78	17	23	20	57		
1966 год	6,7	256	1741	448	98	217	710	1,1	3600
		8	68	24	10	35	55		
1992 год	7,5	580	1700	730	205	137	1035	3.6	4390
		15	54	31	15	17	68		
1999 год	7,6	676	1542	378	157	129	800	6.6	3546
		20	60	20	15	20	65		
2002 год	7,1	610	2372	445	223	250	886	47	4810
		16	63	21	17	26	57		
2010 год	7,2	581	2708	425	366	254	886	35	5275
		12	73	15	36	23	41		

Таблица 2

Средний состав шахтных вод по гидрогеохимическим направлениям (мг/л и %-моль)

Направления	pH	HCO_3	SO_4	CL	Ca	Mg	Na	М
1	4,5	65	2900	195	149	286	830	4390
		2	90	8	11	35	54	
2	7,8	353	1893	483	76	212	876	3940
		10	67	23	6	30	64	
3	6,9	299	1700	1543	125	284	1246	5240
		6	42	52	8	28	64	
4	7,7	545	856	626	39	84	832	2920
		20	39	41	4	15	81	

Таблица 3

Уравнения регрессии содержаний компонентов химического состава шахтных вод по минерализации

Компонент	Направление	<i>N</i>	<i>r</i>	Уравнение
HCO ₃	1	46	-0,71	486-0,094 М
	2	39	0,27	240 + 0,026 М
	3	45	0,47	169 + 0,04 М
	4	35	0,62	-125 + 0,193 М
SO ₄	1	46	0,97	-668 + 0,8 М
	2	39	0,94	-131 + 0,53 М
	3	45	0,85	550 + 0,23 М
	4	35	0,32	514 + 0,2 М
Cl	1	46	-0,20	235 + 0,0 М
	2	39	0,64	0,12 + 0,12 М
	3	45	0,92	-445 + 0,34 М
	4	35	0,54	-196 + 0,22 М
Ca	1	46	0,41	24 + 0,029 М
	2	39	-0,07	83-0,0 М
	3	45	0,19	104 + 0,0 М
	4	35	0,16	79 + 0,0 М
Mg	1	46	0,61	73 + 0,051 М
	2	39	0,45	108 + 0,031 М
	3	45	0,28	175 + 0,013 М
	4	35	-0,26	252-0,035 М
Na	1	46	0,94	123 + 0,11 М
	2	39	0,93	-297 + 0,29 М
	3	45	0,97	-398 + 0,32 М
	4	35	0,77	-467 + 0,38 М

Примечание. *N* – количество определений, *r* – коэффициент корреляции, *M* – минерализация.

направлениях (0,41); для Mg – связи с минерализацией в первом (0,61) и втором (0,45) направлениях; для Na характерна сильная корреляционная связь с минерализацией по всем направлениям (табл. 3).

По первому гидрогеохимическому направлению формируются кислые сульфатные шахтные воды, значение рН опускается до 2,2, содержание SO₄ возрастает до 4,0–4,5, а минерализация – до 10–11 г/л; воды существенно обогащены Fe, Mn, Al, Cu и другими металлами. Происхождение данного направления связано с интенсивным развитием в горных выработках процессов окисления серы и сульфидов, заключенных в углях и вмещающих породах. Шахтные воды первого гидрогеохимического направления вносят наибольший вклад в загрязнение окружающей среды. Второе направление изменения состава шахтных вод приводит к формированию хлоридно-сульфатных шахтных вод, происхождение которых связано как с процессами окисления серы, так и с притоком хлоридных подземных вод при углублении горных выработок.

В третьем гидрогеохимическом направлении еще больше усиливается роль хлоридных ионов, воды становятся сульфатно-хлоридными за счет притока хлоридных подземных вод на глубоких горизонтах отработки угольных пластов, минерализация вод повышается, но процесс окисления серы отходит на второй план.

По четвертому направлению формируются оригинальные содовые (первый тип по О.А. Алекину) шахтные воды с повышенным содержанием иона HCO₃ и очень низкими – Ca и Mg. Происхождение этих вод связано с притоком в горные выработки подземных вод содового типа. Действительно, для Донецкого бассейна установлено два главных вида вертикальной гидрогеохимической зональности:

1) прямая гидрогеохимическая зональность характеризуется увеличением минерализации подземных вод с глубиной до 70–80 г/л и формированием хлоридных натриевых вод, которые сказываются на изменении химического состава шахтных вод по второму и третьему гидрогеохимическим направлениям;

2) обратная гидрогеохимическая зональность приводит к образованию на значительных глубинах маломинерализованных подземных вод содового состава, происхождение которых автор связывает с протеканием испарительно-конденсационных процессов и наличием нефте-газовых скоплений в Восточном Донбассе [6].

Эти содовые подземные воды, поступая в горные выработки, формируют четвертое гидрогеохимическое направление изменения состава шахтных вод.

На втором этапе исследований для изучения закономерностей формирования и генезиса химического состава шахтных вод в разные периоды опробования выполнен корреляционный анализ связей между компонентами состава этих вод.

В 1920-е годы шахтные воды имели в среднем состав хлоридно-сульфатный кальциево-магниевый-натриевый второго типа по О.А. Алекину (табл. 1). С минерализацией (2,9 г/л) наиболее сильные корреляционные связи проявляют сульфат-ион, магний, натрий и кальций (табл. 3). Следует отметить также высокие связи между следующими компонентами: HCO_3^- – pH ($r = 0,85$), SO_4^{2-} – Mg (0,79), Na – Cl (0,62), SO_4^{2-} – pH (–0,57). Отсутствует связь между SO_4^{2-} и Cl, что косвенно указывает на различные источники их происхождения в водах.

Таким образом, для данного периода генезис состава шахтных вод связан преимущественно с развитием процессов интенсивного окисления сульфидов и, частично, с притоком хлоридных подземных вод [3].

В 1940-е годы в период восстановления после затопления (во время оккупации территории) минерализация шахтных вод возросла в среднем почти в 1,5 раза (от 2,8 до 4), а сульфатов – в 1,9 (от 1,4 до 2,8 г/л), доля кислых вод увеличилась с 15 до 71 %.

шахтные воды имели сульфатный кальциево-магниевый-натриевый состав (табл. 1). Анализ корреляционных связей (табл. 5) показывает, что наиболее сильно с минерализацией связаны содержания SO_4^{2-} , Na, Mg, Ca (положительная зависимость), HCO_3^- и pH (отрицательная), отсутствует значимая связь с Cl. Между отдельными компонентами наиболее высоки связи: HCO_3^- – pH ($r = 0,88$), SO_4^{2-} – pH (–0,84), SO_4^{2-} – Na (0,88), Ca – Mg (0,86).

Таким образом, анализ корреляционных связей между компонентами по результатам опробования шахтных вод Восточного Донбасса в 1940-е годы свидетельствует о том, что четко проявилось только первое направление изменения химического состава шахтных вод, второе, третье и четвертое направления практически отсутствуют. Следовательно, генезис состава вод связан со значительным усилением процессов окисления сульфидов и растворения сульфатов.

Характеристика шахтных вод в 1950-е годы проводится по выборке, в которой представлены преимущественно старые восстановленные шахты, на которых возникли проблемы формирования высокоминерализованных вод. В среднем по составу указанные воды являются сульфатными натриевыми, второго типа по О.А. Алекину, все имеют минерализацию более 2 г/л и 40 % – минерализацию более 5 г/л. По сравнению с данными 1920-х годов (табл. 1) в среднем увеличились приблизительно в два раза минерализация вод и содержание SO_4^{2-} и Na. Эта ситуация с шахтными водами угольных месторождений Донбасса (увеличение кислотности и сульфатности в послевоенные годы) стимулировала постановку исследований причин такого положения и поисков путей борьбы с кислыми водами.

Таблица 4

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (1920-е годы)

Показатели	pH	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1,00	0,85	–0,57	0,28	–0,27	–0,35	–0,03	–0,26
HCO_3^-	0,85	1,00	–0,41	0,12	–0,15	–0,20	–0,10	–0,19
SO_4^{2-}	–0,57	–0,41	1,00	0,13	0,68	0,79	0,54	0,87
Cl	0,28	0,12	0,13	1,00	0,38	0,39	0,62	0,58
Ca	–0,27	–0,15	0,68	0,38	1,00	0,83	0,17	0,72
Mg	–0,35	–0,20	0,79	0,39	0,83	1,00	0,27	0,81
Na	–0,03	–0,10	0,54	0,62	0,17	0,27	1,00	0,76
M	–0,26	–0,19	0,87	0,58	0,72	0,81	0,76	1,00

Таблица 5

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (1940-е годы)

Показатели	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1,00	0,88	-0,84	0,27	-0,38	-0,56	-0,66	-0,71
HCO ₃	0,88	1,00	-0,79	0,07	-0,49	-0,55	-0,58	-0,68
SO ₄	-0,84	-0,79	1,00	0,15	0,63	0,78	0,88	0,97
Cl	0,27	0,07	0,15	1,00	0,66	0,56	0,7	0,37
Ca	-0,38	-0,49	0,63	0,66	1,00	0,86	0,30	0,72
Mg	-0,56	-0,55	0,78	0,56	0,86	1,00	0,48	0,84
Na	-0,66	-0,58	0,88	0,07	0,30	0,48	1,00	0,86
M	-0,71	-0,68	0,97	0,37	0,72	0,84	0,86	1,00

Таблица 6

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (1950-е годы)

Показатели	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1,00	0,82	-0,70	-0,07	0,20	0,09	-0,49	-0,49
HCO ₃	0,82	1,00	-0,48	0,24	0,18	-0,09	-0,09	-0,07
SO ₄	-0,70	-0,48	1,00	0,01	-0,10	0,02	0,66	0,78
Cl	-0,07	0,24	0,01	1,00	0,08	-0,31	0,62	0,60
Ca	0,20	0,18	-0,10	0,08	1,00	0,37	-0,36	-0,03
Mg	0,09	-0,09	0,02	-0,31	0,37	1,00	-0,51	-0,22
Na	-0,49	-0,09	0,66	0,62	-0,36	-0,51	1,00	0,92
M	-0,49	-0,07	0,78	0,60	-0,03	-0,22	0,92	1,00

Анализ корреляционных связей показывает (табл. 6), что с минерализацией тесно связаны только три компонента – Na, SO₄, Cl; практически не обнаруживают связи с минерализацией Ca и Mg. Сульфат-ион достаточно тесно коррелируется с M и Na, для хлор-иона характерна связь с Na и M, хотя между SO₄ и Cl связи по парному коэффициенту корреляции не обнаружено.

Обнаруженные корреляционные связи показали, что в формировании химического состава вод в Восточном Донбассе в 1950-е годы доминирует первое гидрогеохимическое направление (67%), ко второму направлению относятся 28% и к третьему – всего 4%. Все это свидетельствует о преобладании процессов окисления сульфидов и растворения сульфатов, при постепенном развитии процессов привноса Cl с дренируемыми подземными водами. Таким образом, резкое увеличение минерализации и содержаний SO₄ (при снижении pH), которое было спровоцировано затоплением шахт во время оккупации Донбасса, сохраняется на долгие годы.

В 1960-е годы зафиксирована высокая неоднородность содержаний основных компонентов, минерализации и pH вод. В среднем по составу это хлоридно-сульфатные магниевые-натриевые воды второго типа. По сравнению с предыдущим периодом 1950-х годов несколько снизились минерализация и концентрация SO₄ и повысилась pH (табл. 1). Концентрации большинства компонентов изменяются в 20–30 раз, для M и SO₄ – в 10–12 раз. Характеристика корреляционных связей приведена в табл. 7.

С минерализацией шахтных вод (3,6 г/л) наиболее сильные связи обнаружены для содержаний Na ($r = 0,91$), SO₄ (0,75) и Cl (0,55). Среди компонентов необходимо отметить следующие связи: pH – SO₄ ($r = -0,68$), pH – HCO₃ (0,66) и Na – Cl (0,63). Особую информацию о наличии четвертого направления несёт отрицательный коэффициент корреляции HCO₃ – Mg (-0,62). Таким образом, анализ корреляционных связей свидетельствует о том, что теперь в формировании химического состава вод участвуют все четыре направления изменения

их состава. Четвёртое направление, приводящее к образованию содовых по составу вод, особенно характерно для шахт Гуково-Зверевского угленосного района [4].

В 1994 году началась ликвидация угольных шахт в Восточном Донбассе путём полного затопления шахт, затопления с перетоком вод в соседние ликвидированные шахты, с поддержанием уровней вод на безопасной глубине, способом «сухой консервации». Ликвидация осуществлялась более чем на 30 шахтах. Поток вод был направлен из недр в отработанное пространство шахт и отобраны пробы вод не было возможности.

К 2010 году процесс ликвидации угольных шахт в Восточном Донбассе в основном был реализован. В среднем по составу шахтные воды были сульфатными кальциево-натриевыми второго типа. Характерно дальнейшее повышение минерализации вод, преимущественно за счет увеличения содержания SO_4 и Na. Воды имеют нейтральную реакцию среды. Характеристика

взаимосвязей между компонентами приведена в табл. 8.

С минерализацией наиболее сильные связи обнаружены для SO_4 , Mg, Na, Fe, следует отметить связь содержания SO_4 с Mg и Fe, а pH отрицательно связан с Fe и SO_4 . Все это убедительно свидетельствует, что после ликвидации угольных шахт в Восточном Донбассе генезис химического состава шахтных вод связан преимущественно с развитием процессов растворения сульфатов, однако начинают интенсифицироваться процессы окисления сульфидов, что может привести в дальнейшем к снижению pH вод.

Заключение

Таким образом, изучение корреляционных зависимостей между компонентами химического состава шахтных вод Восточного Донбасса позволило уверенно выделить основные направления изменения их состава. В 1920–1928 годах генезис состава шахтных вод связан преимущественно с развитием процессов интенсивного окисления

Таблица 7

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (1960-е годы)

Показатели	pH	HCO_3	SO_4	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1,00	0,66	-0,68	0,24	-0,18	-0,45	-0,15	-0,33
HCO_3	0,66	1,00	-0,48	0,31	-0,23	-0,62	0,24	-0,02
SO_4	-0,68	-0,48	1,00	-0,09	0,32	0,56	0,53	0,75
Cl	0,24	0,31	-0,09	1,00	-0,04	0,09	0,63	0,55
Ca	-0,18	-0,23	0,32	-0,04	1,00	0,24	-0,06	0,21
Mg	-0,45	-0,62	0,56	0,09	0,24	1,00	0,04	0,38
Na	-0,15	0,24	0,53	0,63	-0,06	0,04	1,00	0,91
M	-0,33	-0,02	0,75	0,55	0,21	0,38	0,91	1,00

Таблица 8

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод в 2010 году

Показатели	pH	HCO_3	SO_4	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	M
pH	1,00	-0,03	-0,55	0,13	-0,35	-0,59	-0,12	-0,55	-0,46
HCO_3	-0,03	1,00	-0,16	0,09	-0,09	-0,14	0,19	-0,32	-0,05
SO_4	-0,55	-0,16	1,00	0,04	0,42	0,84	0,65	0,78	0,95
Cl	0,13	0,09	0,04	1,00	0,23	0,21	0,49	-0,01	0,34
Ca	-0,35	-0,09	0,42	0,23	1,00	0,45	0,08	0,16	0,44
Mg	-0,59	-0,14	0,84	0,21	0,45	1,00	0,38	0,78	0,84
Na	-0,12	0,19	0,65	0,49	0,08	0,38	1,00	0,34	0,79
Fe	-0,55	-0,32	0,78	-0,01	0,16	0,78	0,34	1,00	0,71
M	-0,46	-0,05	0,95	0,34	0,44	0,84	0,79	0,71	1,00

сульфидов и, частично, с притоком хлоридных подземных вод. В 1943–1945 годах четко проявилось только первое направление изменения химического состава шахтных вод, второе, третье и четвертое направления практически отсутствуют. Следовательно, генезис состава вод обусловлен значительным усилением процессов окисления сульфидов и растворения сульфатов.

В формировании химического состава вод в Восточном Донбассе в 1950-е годы преобладали процессы окисления сульфидов и растворения сульфатов, при постепенном развитии процессов привноса Cl с дренируемыми подземными водами. Анализ корреляционных связей свидетельствует о том, что в 1960-е годы в формировании химического состава вод участвуют все четыре направления изменения их состава. Четвертое направление, приводящее к образованию содовых по составу вод, особенно характерно для шахт Гуково-Зверевского угленосного района [4].

В 2010 году после ликвидации угольных шахт в Восточном Донбассе генезис химического состава шахтных вод обусловлен преимущественно развитием

процессов растворения сульфатов, однако начинают интенсифицироваться процессы окисления сульфидов. Всё это ведёт в дальнейшем к значительному увеличению минерализации, снижению pH шахтных вод и резкому росту загрязнения подземных и поверхностных вод, что требует планирования и реализации действенных реабилитационных мер.

Список литературы

1. Гавришин А.И. Гидрогеохимические исследования с применением математической статистики и ЭВМ. – М.: Недра, 1974. – 146 с.
2. Гавришин А.И., Корadini А. Многомерный классификационный метод и его применение при изучении природных объектов. – М.: Недра, 1994. – 92 с.
3. Гавришин А.И. Сборник задач по математической статистике для геологов. – Новочеркасск: изд. ЮРГТУ(НПИ), 2010. – 102 с.
4. Гавришин А.И. Закономерности формирования химического состава грунтовых вод каменноугольных отложений Восточного Донбасса // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 1. – С. 102–106.
5. Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С. О формировании химического состава грунтовых вод в Шахтинском угленосном районе Восточного Донбасса // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 5. – С. 111–115.
6. Родионов Д.А. Справочник по математическим методам в геологии. – М.: Недра, 1991. – 336 с.