

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕРРИТОРИИ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Д.Ю. Шулаков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Выполнен анализ качества данных в сейсмологическом каталоге для Жезказганского месторождения, охватывающем период с 1997 по 2021 гг. На основании анализа внутренней структуры сейсмичности установлено, как изменялась чувствительность мониторинговой системы. Также показано, что основные параметры сейсмического режима для территории данного месторождения изменяются достаточно слабо. По результатам переобработки исходных сейсмограмм установлено, что оценка энергии сейсмических событий в данном каталоге является систематически заниженной, и получена эмпирическая формула, позволяющая скорректировать данную ошибку. Показано, что с учетом установленных ограничений сейсмический каталог для территории данного месторождения является кондиционным и возможно его использование для решения задач геодинамического районирования месторождения и прогноза массовых обрушений горных выработок.

Ключевые слова: Жезказганское месторождение, сейсмический режим, каталог, контроль качества, сейсмическая энергия, представительность.

Введение

Жезказганское месторождение меди (ЖММ) расположено в центральной части Казахстана, оно отрабатывается 5-ю рудниками и охватывает площадь 10×7 км. Достаточно активная его эксплуатация ведется с середины 20 века. В результате шло увеличение площади подработки земной поверхности, возрастание числа перекрытий, отработанных залежей и снижение площади несущего нагрузку массива горных пород. К настоящему времени открытое выработанное пространство имеет суммарный объём порядка 180 млн. м³ и поддерживается десятками тысяч междукамерных целиков.

С середины 90-х годов прошлого века в геомеханической обстановке на ЖММ начали происходить качественные изменения, проявляющиеся в объединении отдельных участков в крупные ослабленные районы и обрушениях налегающей толщи на больших площадях, зачастую с выходом на дневную поверхность [2]. В настоящее время большая часть запасов уже извлечена и широко применяется повторная отработка, что придает дополнительную остроту проблеме прогноза обрушений. При этом значительная часть выработок уже обрушена (находится в ослабленном/неустойчивом состоянии). Многие обрушения имеют выход на поверхность (площадь около 5-6 км²).

Одним из важнейших инструментов контроля геодинамической обстановки на территории месторождения является режимный сейсмологический мониторинг, ведущийся с марта 1997 г. Первоначально наблюдения велись с использованием региональной системы контроля РРТС (ПП «Элгео», г. Алматы). В 2000 г. данная система была заменена на систему детального сейсмического контроля СДСК того же производителя, а с 2012 г. – на программно-аппаратный комплекс производства компании ISS Int. (ЮАР) [3]. Каждая из этих систем имела свои характеристики, влияющие на точность определения параметров очагов сейсмических событий. Кроме того, и количество действующих сейсмических пунктов, и их пространственное расположение регулярно изменялись. Безусловно, всё это оказывает влияние и на представительность сейсмического каталога (наличие или отсутствие пропусков событий) на разных участках контролируемой территории и на корректность определения энергетических характеристик зарегистрированных событий.

Результаты обработки сейсмических событий заносятся в каталог, включающий в себя дату и время возникновения события, координаты эпицентра и энергетический класс K , представляющий собой десятичный логарифм выделившейся сейсмической энергии. Данный каталог включает в себя свыше 12000 событий, зарегистрированных в период с февраля 1997 г. по 2021 г. Поскольку он является первичным источником информации о пространственной и временной динамике сейсмического режима, в первую очередь следует выполнить тщательный анализ качества представленных в нем данных и оценить возможность их использования для дальнейшего анализа.

Оценка энергетической представительности

Для получения более четкого представления о внутренней структуре микросейсмической активности, а также для дополнительной проверки возможного наличия проблем с оценкой энергии сейсмических событий был выполнен расчет графиков повторяемости для разных интервалов времени.

Достаточно давно рядом исследователей установлено, что сейсмический процесс обладает фрактальными свойствами, то есть проявляет характерные свойства иерархической самоподобной системы в распределении землетрясений в пространстве, во времени и по энергии. Наиболее четко и наглядно это было показано в середине XX века в работе Б. Гутенберга и Ч. Рихтера [1]. Они установили, что распределение числа землетрясений по магнитуде (энергии) описывается степенной функцией. Эта зависимость получила название «закон Гутенберга-Рихтера», а график, построенный в двойных логарифмических координатах, – «график повторяемости землетрясений». Применительно к энергетическому классу землетрясений K закон Гутенберга-Рихтера может быть записан следующей формулой:

$$\log_{10}N = a - bK, \quad (1)$$

где N – количество землетрясений с энергетическим классом $>K$, a и b – константы. В ходе исследований было установлено, что константы a и b отражают особенности сейсмического режима в данном конкретном месте за определенный промежуток времени и не являются постоянными даже для одного сейсмоактивного региона.

Для анализа энергетической представительности данных в сейсмическом каталоге был выполнен расчет графиков повторяемости для интервалов длительностью в 1 год. На рис. 1 представлен в качестве примера такой график за 2012 г. Представительный диапазон энергий сейсмических событий определяется по линейной части кумулятивного графика повторяемости. Отклонение от линейной зависимости в правой части графика чаще всего бывает обусловлено недостаточной длительностью наблюдений (чем крупнее сейсмические события, тем реже они происходят). Однако для техногенной сейсмичности также существуют ограничения по максимальной энергии, связанные, собственно, с природой самих событий: максимальная энергия определяется горно-техническими условиями (преимущественно – масштабом ведения горных работ, глубиной выработок и физико-механическими свойствами пород).

Как показал анализ графиков повторяемости за разные годы, угол их наклона (коэффициент b в уравнении 1) остается практически постоянным, что говорит о достаточно стационарном характере сейсмического режима. В то же время величина минимальной представительно регистрируемой энергии, определяемой по перегибу в левой части графика, с течением времени существенно меняется, что обусловлено изменениями в

конфигурации и/или работоспособности сейсмических станций, входящих в сеть. При дальнейшем анализе динамики микросейсмической активности эти изменения необходимо учитывать, так как они могут оказать существенное влияние на результаты интерпретации.

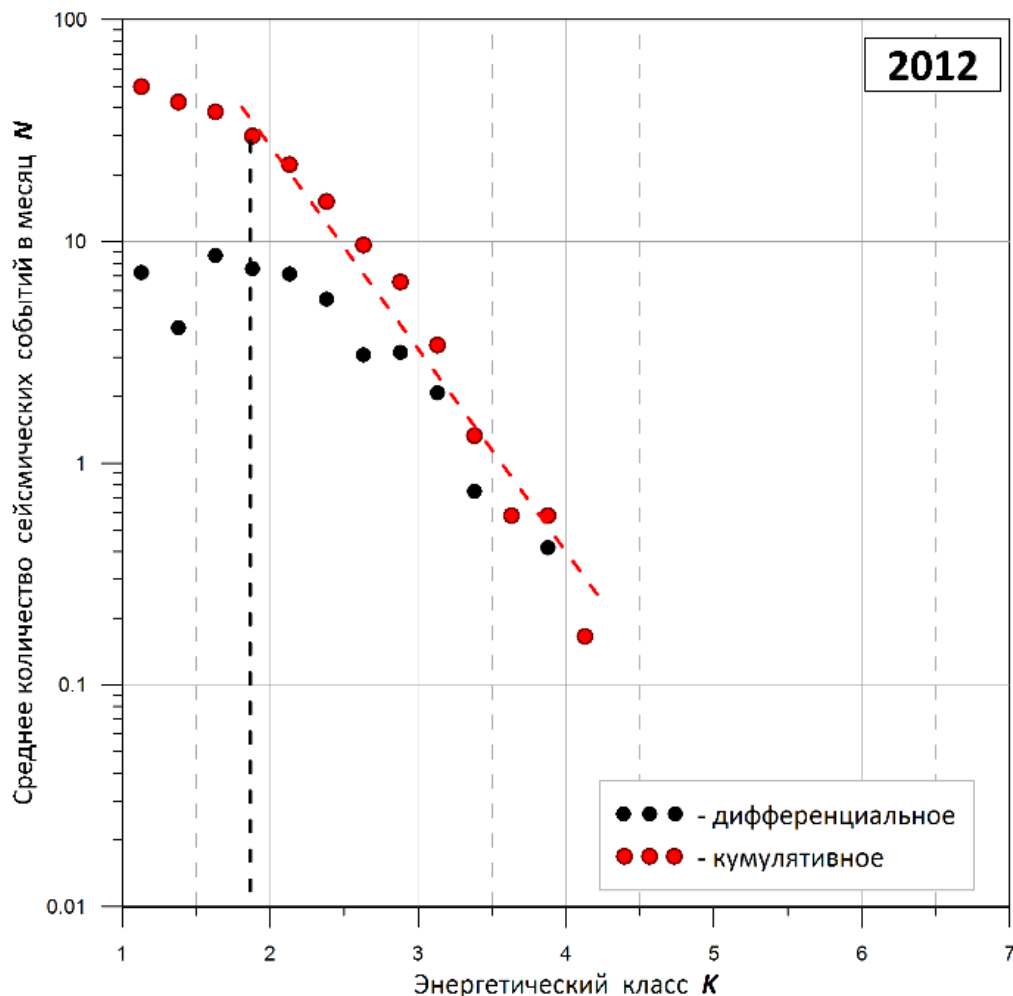


Рис. 1. График повторяемости сейсмических событий за 2012 г.

По результатам анализа графиков повторяемости для каждого годового интервала был определен минимальный предельно регистрируемый энергетический класс K_{min} . График изменения его величины со временем представлен на рис. 2.

Как видно из данного рисунка, параметр K_{min} принимал значения в диапазоне от 1.8 до 3.6, то есть минимальная энергия регистрируемых событий изменялась в разные периоды времени почти в 100 раз. В первую очередь подобные изменения могут быть объяснены изменением в аппаратном оснащении мониторинговой системы: 2000 г. – замена РРТС на СДСК, 2012 г. – замена СДСК на ИССИ. В то же время аномально низкие значения параметра K_{min} в 2011-2014 гг. не могут быть объяснены исключительно улучшением регистрирующей аппаратуры. Наиболее возможным представляется либо ошибка в конфигурации системы обработки сейсмических событий, либо какие-то методические неточности при определении их энергии, так как уверенная регистрация сейсмических событий с энергией 100 Дж и менее при имеющейся плотности сейсмических датчиков представляется маловероятной.

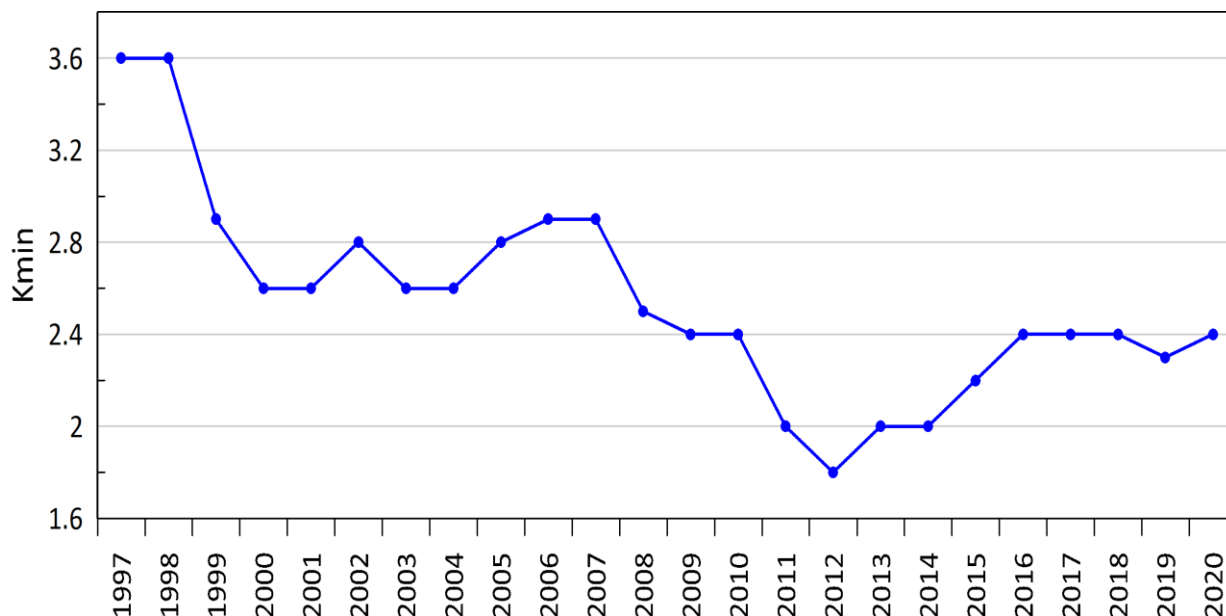


Рис. 2. Динамика изменения минимального представительного регистрируемого энергетического класса K_{min}

В целом можно считать установленным фактом, что общие параметры сейсмического режима в пределах контролируемой территории за период с 1997 по 2020 гг. существенных изменений не претерпели. При этом представительность сейсмического каталога в области низких энергий является весьма неоднородной, и перед сравнением данных, полученных для разных частей контролируемой территории и/или для разных интервалов времени обязательно требуется уточнение параметра K_{min} .

Оценка чистоты каталога

При обработке данных сейсмологических наблюдений в регионах с активно ведущейся добычей полезных ископаемых значительную проблему могут составлять технологические взрывы на рудниках или карьерах. Далеко не всегда у интерпретатора есть возможность уверенно отличать эти взрывы от других сейсмических событий, связанных с процессами разрушения в горных породах. Кроме того, взрывные работы сами по себе могут приводить к кратковременной сейсмической активизации в непосредственной близости от места взрыва – этот процесс близок по своей природе к афтершоковой активности после землетрясения.

Поскольку взрывные работы на горнодобывающих объектах, как правило, производятся в определенные и довольно узкие интервалы времени, их наличие в каталоге можно определить по неравномерности распределения сейсмической активности по времени. Условно «природная» сейсмичность связана с факторами, длительность действий которых измеряется месяцами и годами, и, следовательно, распределена по времени достаточно равномерно.

Для анализируемого каталога был выполнен анализ распределения количества событий по 2-часовым интервалам в течение суток и по дням недели. Графики распределений представлены на рис. 3.

Как видно из представленных графиков, распределение и по времени суток, и по дням недели является достаточно равномерным, что свидетельствует о высокой степени чистоты каталога.

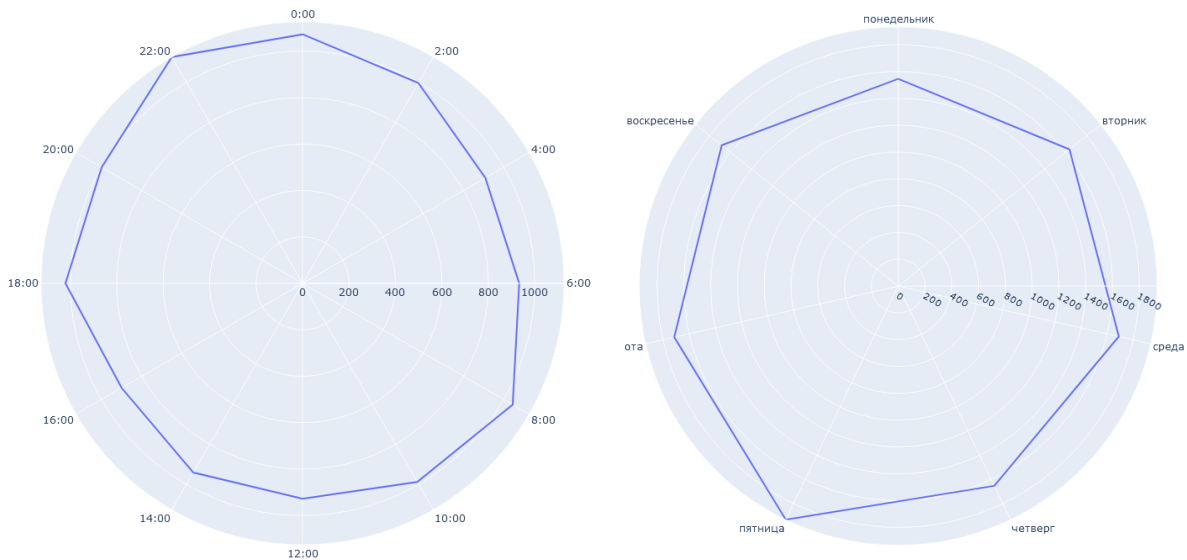


Рис. 3. Распределение количества сейсмических событий по времени суток и по дням недели

Корректировка энергетических характеристик сейсмических событий

В процессе ручной переобработки записей сейсмических событий на территории Жезказганского месторождения было установлено наличие существенных расхождений в энергетических параметрах, полученных специалистами «ГИ УрО РАН» и «Казахмыса». Необходимо иметь в виду, что при оценке степени опасности или для решения задач прогноза корректная оценка энергии является не менее важной, чем координаты гипоцентра, так как она непосредственно связана с величиной сброса напряжения в очаге и его геометрическими размерами.

Для оценки энергии сейсмических событий наиболее часто используются 2 величины – энергетический класс K и магнитуда M . Энергетический класс представляет собой десятичный логарифм выделившейся в очаге сейсмической энергии:

$$K = \log_{10}(E) \quad (2)$$

где E – суммарная энергия сгенерированных сейсмическим событием упругих волн на референц-сфере радиусом 10 км.

Магнитуда землетрясения является также безразмерной логарифмической величиной, характеризующей его энергию. В сейсмологии существует много видов магнитуд, но при обработке данных сейсмического мониторинга на горнодобывающих объектах чаще всего используется локальная (Рихтеровская) магнитуда M_L , определяемая по формуле

$$M_L = \lg A + \sigma, \quad (3)$$

где A – амплитуда смещения (в микрометрах) на горизонтальной компоненте стандартного сейсмографа Вуда-Андерсона, σ – корректирующая функция, значения которой зависят от расстояния до эпицентра и от местных особенностей распространения сейсмических волн.

Однозначной физически осмысленной связи между энергетическим классом и магнитудой не существует, но есть достаточно устойчивая корреляционная зависимость, описываемая простым уравнением:

$$K = 1.8M + 4.0 \quad (4)$$

В каталоге, генерируемом программой Location (разработка «ГИ УрО РАН»), содержится информация как об энергетическом классе, так и о магнитуде землетрясения. В каталоге, составляемом специалистами «Казахмыса» при помощи программного пакета JMTS, содержится только энергетический класс. При этом достоверность оценки энергии в программе JMTS вызывает некоторые сомнения и, как минимум, требует проверки. С целью решения данной задачи было выполнено сопоставление значений класса K для одних и тех же событий, обработанных в обоих программных пакетах. Из каталога были выбраны 30 событий, имеющих разную энергию и произошедших в разное время на разных участках месторождения. Результаты сравнения определений их энергии представлены на рис. 4. Как видно из него, энергетический класс, определенный в пакете JMTS (K_{ISS}), оказывается заметно ниже, чем в Location ($K_{ГИ}$). Но при этом между ними прослеживается тесная линейная корреляция, описываемая регрессионным уравнением

$$K_{ISS} = 0.78K_{ГИ} - 0.31 \quad (5)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.92$.

Необходимо отметить, что наиболее крупные из сейсмических событий, происходящих на рудниках Жезказгана, регистрируются не только локальной мониторинговой системой, но и региональными сейсмическими станциями, входящими в сеть Казахстанского Национального Центра Данных (КНДЦ), расстояние до которых составляет от 570 до 1100 км. В каталоге этой организации также приводятся оценки энергетического класса и магнитуды регистрируемых сейсмических событий. При этом надо иметь в виду, что на подобных расстояниях для относительно слабых событий ошибка определения координат эпицентра может достигать 10 км и более.

Всего за период с 2010 по 2020 гг. сеть КНДЦ было зарегистрировано свыше 30 сейсмических событий с эпицентрами в районе г. Жезказган. Для 21 одного из них были найдены соответствующие записи в каталоге системы ISS. Остальные события в каталоге КНДЦ, по всей видимости, либо являются взрывами на карьерах региона, либо их координаты определены ошибочно.

Сопоставление энергетических классов, определенных по сетям ISS и КНДЦ, также представлено на рис. 4 голубым цветом. Как видно из него, все значения лежат ниже аппроксимирующей линии, т.е. значения энергетического класса по данным КНДЦ еще выше, чем по результатам обработки в «ГИ УрО РАН». Однако надо иметь в виду, что из-за большого расстояния до станций национальной сети отношение сигнал/помеха на них будет достаточно низким, что может привести к большой ошибке определения K и систематическому завышению его значений. Косвенно этот вывод подтверждает низкая степень корреляции со значениями K , полученными по результатам обработки данных локальной сети ISS.

Резюмируя результаты анализа определения энергии сейсмических событий, можно сделать следующий вывод. Энергетический класс, определенный по результатам обработки в пакете JMTS (K_{ISS}), является систематически заниженным, однако имеется тесная линейная корреляция его значений с корректным значением K , которое, исходя из уравнения (5), может быть определено по формуле

$$K = 1.28 K_{ISS} + 0.40 \quad (6)$$

При дальнейшем анализе данных из сейсмического каталога системы ISS рекомендуется использовать значения энергетического класса, откорректированные с использованием формулы (6).

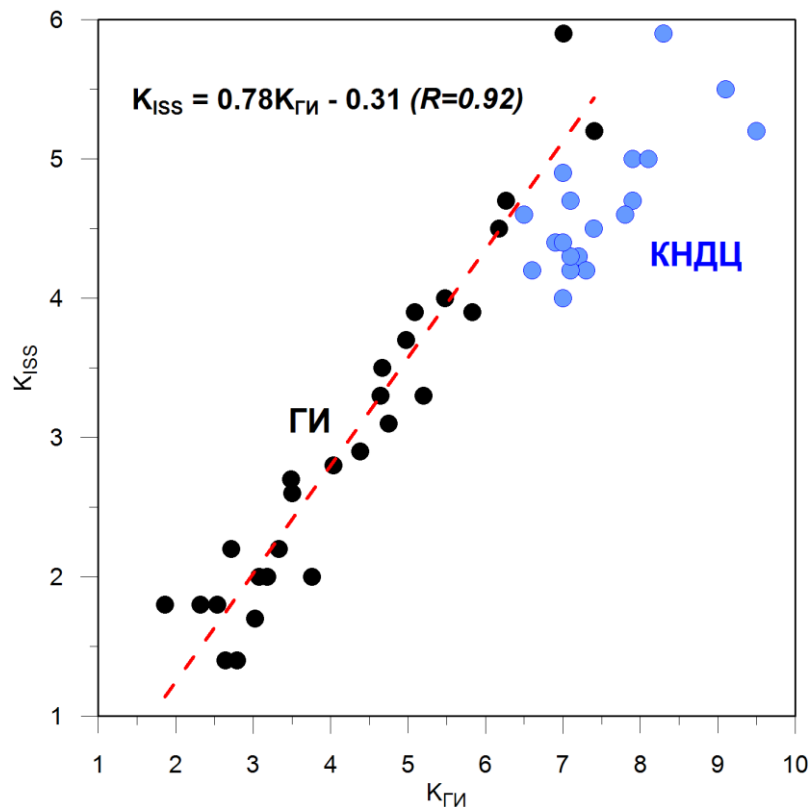


Рис. 4. Зависимость между энергетическими классами событий, определенных по результатам обработки в «ГИ УрО РАН» (K_{GI}) и в ТОО «Казахмыс» (K_{ISS})

Выводы

На основании детального анализа внутренней структуры сейсмического каталога Для Жезказганского месторождения, охватывающего период с 1997 по 2020 гг., установлено, что основные параметры сейсмического режима с течением времени меняются несущественно, в то время как минимальная предельно регистрируемая энергия (т.е. чувствительность сети) менялась в пределах двух порядков. Также показано, что в данном каталоге наблюдается систематическое занижение энергии сейсмических событий, которое, однако, может быть скорректировано при помощи полученной эмпирической зависимости.

Таким образом, установлено, что сейсмический каталог для территории Жезказганского месторождения при соблюдении установленных ограничений может быть использован в качестве исходной информации для анализа связи параметров сейсмичности с горнотехническими условиям на рудниках – как в ретроспективном режиме, так и для решения задач прогноза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000401-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. – 2nd ed. – Princeton: Princeton University Press, 1954. – 284 p.
2. Герасименко В.И., Юн А.Б., Ибраев Т.Т. Проблемы геомеханики при разработке Жезказганского месторождения // Горн. журн. – 2002. – № 5. – С.
3. Мансуров В.А., Герман В.И. Прогноз обрушений на Жезказганском месторождении по данным сейсмического мониторинга // Горн. журн. – 2007. – № 1. – С. 89-92.