

П.В. Николенко, М.Д. Чепур

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОЯВЛЕНИЙ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ*

Рассмотрена возможность использования акустико-эмиссионного эффекта памяти (эффект Кайзера) для контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород. В качестве «носителя памяти» предложено использовать не горные породы, а синтезированные в лабораторных условиях композиционные материалы. Одним из перспективных направлений развития такого метода могут стать новые подходы к обработке результатов измерений. Предложено использовать комплексный спектральный анализ акустико-эмиссионных сигналов через построение полных спектрограмм всего процесса нагружения. Описаны способы трансформации зависимости величины нагрузки в функции от времени для обеспечения ее синхронизации с получаемыми спектрограммами. Показано, что для выявления особенностей проявления эффекта Кайзера к спектрограммам необходимо применять сглаживание скользящим средним в прямоугольном окне. Рассмотрены аспекты выбора параметров окна сглаживания. По результатам анализа обработанных спектрограмм установлено, что эффект памяти в исследованных композитах проявляется не только в виде всплеска активности акустической эмиссии, но и в виде резкого изменения спектрального состава акустических событий в диапазоне частот 130—150 кГц. Описанная закономерность позволяет выявлять точный момент проявления эффекта Кайзера даже на очень «зашумленных» акустограммах.

Ключевые слова: эффект Кайзера, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, контроль, спектральный анализ, композиционный материал.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-129-135

Введение

Одним из наиболее перспективных методов контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород является так называемый метод акустико-эмиссионной памяти. Метод основан на использовании так называемого эффекта Кайзера (ЭК). Эффект про-

является в горных породах, металлах и композиционных материалах и заключается в невоспроизводимости параметров акустической эмиссии (АЭ) в последующем цикле нагружения по сравнению с предыдущим и скачкообразном восстановлении этих параметров в момент достижения максимального уров-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-10009).

ня напряжения предшествующего цикла [1]. Первые попытки практического применения ЭК для оценки полей напряжений в породном массиве относятся ко второй половине 1970-х годов. При этом в качестве «носителя памяти» выступали образцы пород, извлеченные из массива колонковым бурением [2, 3]. Дальнейшее развитие метода заключалось в определении параметров формирования и проявления ЭК в образцах горных пород различных генотипов при разных схемах их нагружения [4–7].

В последние годы метод, основанный на применении ЭК, получил развитие за счет замены «носителя памяти» с горных пород со сложно прогнозируемыми свойствами на композиционные материалы, акустические и механические свойства которых закладываются на этапе синтеза [8]. Использование композитов позволило значительно снизить разброс оценок напряжений в массиве за счет исключения фактора неопределенности, вызванного случайным распределением свойств в «носителе». Дополнительным преимуществом использования материалов с программируемыми свойствами можно считать появление возможности применения специфических приемов и алгоритмов обработки результатов измерений. На первый план в этом случае выходит спектральный анализ АЭ сигналов.

Попытки использования анализа изменения спектров акустической эмиссии обычно сталкиваются рядом проблем аппаратурного и методического характера. Так, при использовании в качестве основного информативного параметра положения максимума спектра f_{\max} неизбежно возникает необходимость использования широкополосных акустических преобразователей [9]. При этом известно, что чувствительность таких преобразователей значительно уступает их резонансным аналогам [10].

Преодоление описанных проблем возможно за счет комплексного спектрального анализа всех волновых форм зарегистрированных АЭ событий через построение спектрограмм.

Постановка и результаты экспериментов

В экспериментальных исследованиях участвовали образцы композиционных материалов в виде цилиндров высотой 26 мм и высотой 52 мм. Матрицей для всех образцов выступала эпоксидная смола PoxySystems L. В качестве наполнителя использовались дисперсно распределенные нити углеволокна, имеющие длину 3 мм, толщину 15 мкм и весовое соотношение с матрицей 1/1000. Образцы подвергались одноосному многоцикловому нагружению с возрастающей от цикла к циклу нагрузкой на специализированном стенде с низким уровнем собственных шумов [11]. При этом производилась запись основных параметров АЭ, а также полных волновых форм всех зарегистрированных импульсов с помощью многоканального акустико-эмиссионного комплекса A-Line 32D с комплектом резонансных акустических преобразователей GT-200 и полосой пропускания 25–500 кГц. Длительность записи одной волновой формы составляла 5000 отсчетов при интервале дискретизации 0,2 мкс. Также регистрировалось время проявления события с точностью до 1 мкс.

Результатом эксперимента являлись полученные зависимости осевой механической нагрузки σ и активности акустической эмиссии от времени нагружения t , а также пакет отдельных осциллограмм каждого АЭ события. Все полученные осциллограммы подвергались быстрому преобразованию Фурье для перевода их в спектральную форму. При этом для соблюдения требований преобразования длительность сигналов огра-

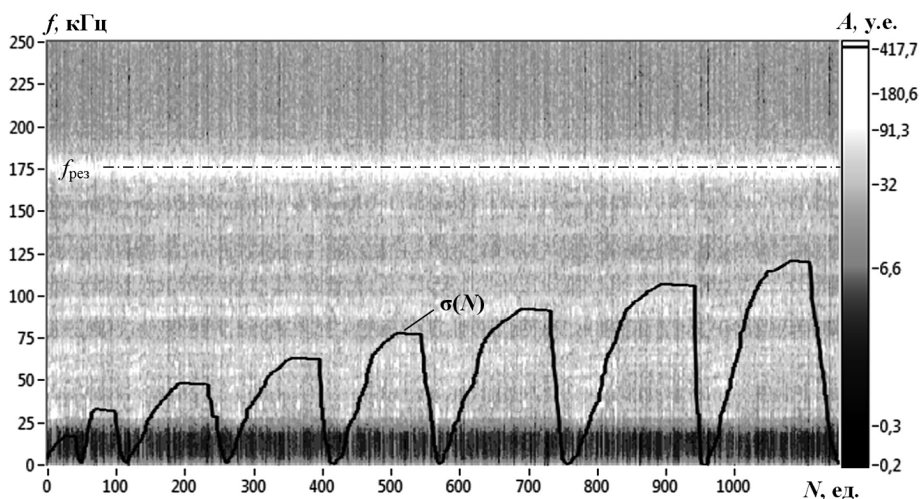


Рис. 1. Пример зарегистрированной при нагружении образца № 1 спектрограммы с наложением зависимости $\sigma(N)$

Fig. 1. An example of a spectrogram recorded under loading of sample No. 1 with the addition of $\sigma(N)$

ничивалась 4096 отсчетами. Полученный таким образом набор амплитудных спектров представлялся в виде так называемой спектрограммы — трехмерного изображения, где по горизонтальной оси откладывается номер АЭ события N , по вертикальной — частота f , а цветом кодируется амплитуда A . Для корректной интерпретации полученных спектрограмм на них требуется наложить зависимость $\sigma(t)$. При этом возникает определенное несоответствие. Особенностью формирования осциллограммы является последовательное расположение спектров в ней в функции от порядкового номера. При этом в зависимости $\sigma(t)$ по оси абсцисс откладывается время с периодом дискретизации $t_{\text{диск}} = 1$ с. В этом случае, с учетом того, что в одну секунду происходит сразу несколько АЭ событий, происходит «рассинхронизация» спектрограммы и графика нагрузки. Для решения этой проблемы существует два пути — коррекция осциллограммы или коррекция зависимости $\sigma(t)$. Корректирование осциллограммы является трудоемким процессом и, впоследствии, может осложнить ее дальнейшую обработку.

Наиболее простым решением является трансформация зависимости $\sigma(t)$ в $\sigma(N)$.

При регистрации нагрузки запись начинается с первой секунды. Таким образом, порядковый номер записи значений нагрузки одновременно является и секундой, на которой эта нагрузка была зарегистрирована. Для трансформации $\sigma(t)$ в $\sigma(N)$ из файлов осциллограмм берется информация о точном времени проявления АЭ события $t_{\text{соб}}$. Величины $t_{\text{соб}}$ округляются до целых. В этом случае $t_{\text{соб}}$ одновременно становится индексом зарегистрированного отсчета нагрузки σ . Таким образом из всего массива отсчетов $\sigma(t)$ выбираются те, которым соответствуют $t_{\text{соб}}$. Пример полученной в результате нагружения образца № 1 осциллограммы с наложенной зависимостью $\sigma(N)$ приведен на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что без дополнительно обработки не прослеживаются никаких закономерностей изменения спектрального состава АЭ событий при циклическом нагружении образца композиционного материала. В осциллограмме выделяется только область повышенных амплитуд вдоль горизонтальной

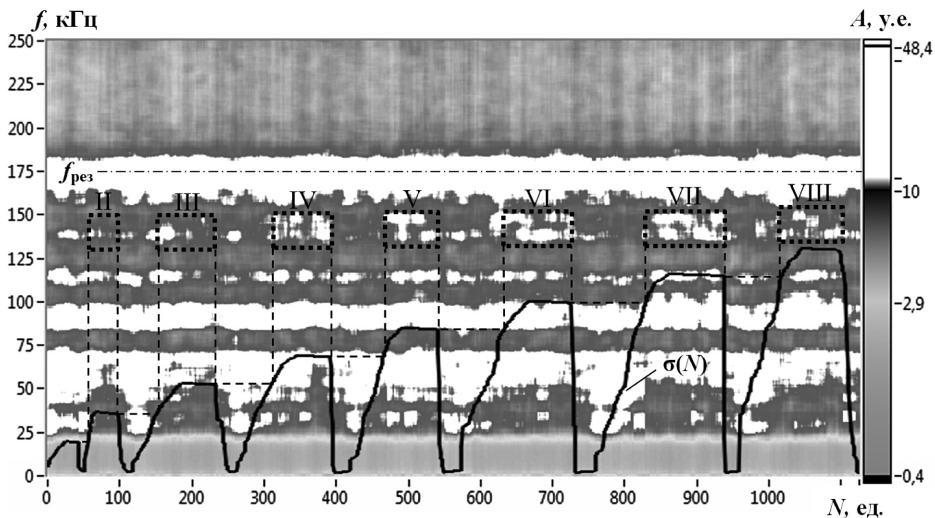


Рис. 2. Пример сглаженной спектрограммы с наложением зависимости $\sigma(N)$ (римскими цифрами отмечены номера циклов нагружения)

Fig. 2. An example of a smoothed spectrogram with superposition of the $\sigma(N)$ dependence (roman numerals indicate the numbers of load cycles)

линии на уровне 175 кГц. Подобная линия обусловлена резонансной формой АЧХ используемого преобразователя, для которого резонансная частота как раз и составляет $f_{рез} = 175$ кГц.

Вид представленной на рис. 1 осциллограммы в первую очередь обуславливается случайной природой отдельных АЭ импульсов. Уменьшить влияние «случайного» компонента возможно при использовании специальной обработки. В данном случае предлагается сглаживание спектрограммы скользящим средним в прямоугольном окне в соответствии с выражением

$$m_{i,j} = \frac{1}{a \cdot b} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b A_{i,j}, \quad (1)$$

где a и b — ширина и высота окна сглаживания; $A_{i,j}$ — элементы исходной матрицы амплитуд АЭ событий.

Следует отметить, что при использовании скользящего среднего теряется информация об абсолютных значениях амплитуд зарегистрированных АЭ импульсов. Такая потеря, впрочем, не ока-

зывает существенного влияния на результаты интерпретации спектрограмм, так как в конечном итоге значение имеет лишь относительное изменение амплитуд на различных стадиях нагружения.

При сглаживании скользящим средним возникает проблема выбора параметров окна сглаживания. На практике конкретные численные значения для получения наилучшего результата подбираются оператором. Однако при использовании слишком больших окон возникают краевые эффекты — потери данных на краях области сглаживания. В данном случае для сглаживания было выбрано окно с параметрами $a = 15$ и $b = 5$ при количестве зарегистрированных АЭ импульсов $N = 1150$ и количестве дискретов по оси частот — 2048. Результат преобразования осциллограммы для образца № 1 представлен на рис. 2.

В результате обработки осциллограммы на ней оказывается возможным выделить ряд закономерностей. Во-первых, в диапазоне до 50 кГц наблюдается снижение роли низких частот при уве-

личении нагрузки. При этом амплитуды низких частот возвращаются к исходным уровням при снятии нагрузки.

Подобное изменение может быть связано с закрытием дефектов, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси нагружения. В этом случае с изменением размеров дефектов происходит и изменение спектрального состава соответствующих им акустических импульсов [12, 13].

Одновременно с низкочастотными составляющими значительные изменения наблюдаются и в диапазоне высоких частот (130÷150 кГц). В этом диапазоне изменение амплитуд происходит скачкообразно в момент достижения величинной σ уровня максимума предыдущего цикла. Причем наиболее отчетливо такое изменение начинается с IV цикла нагружения, т.е. с уровня нагрузки $\sigma = 0,1\sigma_{сж}$. Таким образом эффект Кайзера в исследуемом материале проявляется не только в виде скачка активности акустической эмиссии, но и в виде резкого из-

менения спектральных характеристик АЭ сигналов.

Выводы

При использовании для контроля напряжений в породном массиве методом ЭК «носителя памяти» в виде дисперсно наполненного композита момент проявления акустико-эмиссионной памяти возможно с высокой точностью определять не только по изменению стандартных параметров акустической эмиссии, но и по значительным изменениям спектрального состава АЭ импульсов. Подобные изменения выявляются при специальной обработке полных спектрограмм всех зарегистрированных событий акустической эмиссии. Описанный способ выявления момента проявления ЭК особенно актуален при анализе «зашумленных» зависимостей (σ), когда несколько высокоамплитудных АЭ событий в начале нагружения могут практически полностью скрыть всплеск эмиссии при возникновении эффекта памяти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1953, Vol. 24, No. 1, 2, pp. 43–45.
2. Kanagawa T., Hayashi M., Nakasa H. Estimation of spatial geo-stress in rock samples using Kaiser effect / Centr. Res. Inst. of Electric Power Ind. (CRIEPI) Report No. 375017. — Abico, Japan, 1976.
3. Kurita K., Fujii N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission // Geoph. Res. Letts. — 1979. — Vol. 6. — No. 1. — P.9–12.
4. Wang H.-J., Tang L., Ren X.-H., Yang A.-Y., Niu Y. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading, Rock and Soil Mechanics, 2014, Vol. 35, Issue 4, pp. 1007–1014.
5. Meng Q., Zhang M. E., Han L., Pu H., Chen Y. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, pp. 1–20.
6. Holcomb D. J., Costin L. S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emission, J. Appl. Mech., Trans. ASME, 1986, Vol. 53, No. 3, pp. 536–544.
7. Hughson D. R., Crawford A. M. Kaiser effect gauging: the influence of confining stress on its response, Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics, Rotterdam: A. A. Balkema, 1987, Vol. 2, pp. 981–985.
8. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L. Acoustic emission in composites and application for stress monitoring in in rock masse, J. of Mining Science, 2014, Vol. 61, Issue 2. — P. 80–83.
9. Zhang N.-B., Qi Q.-X., Ouyang Z.-H., Li H.-Y., Zhao S.-K., Xu, Z.-J. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society, 2014, Vol. 39, Issue 2, pp. 389–394.
10. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.

11. Николенко П. В., Цариков А. Ю. Лабораторный стенд для механических и акустико-эмиссионных испытаний образцов композиционных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 4. — С. 273–278.

12. Куксенко В. С., Станчиц С. А., Томилин Н. Г. Оценка размеров растущих трещин и областей разгрузки по параметрам акустических сигналов // Механика композитных материалов. — 1983. — № 3. — С. 536–543.

13. Куксенко В. С., Мансуров В. А., Манжиков Б. Ц., Фролов Д. И., Станчиц С. А., Инжеваткин И. Е. Подobie в процессе разрушения горных пород на различных масштабных уровнях // Известия АН СССР, Физика Земли. — 1990. — № 6. — С. 5. **ИЗБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николeнко Петр Владимирович¹ — кандидат технических наук, доцент,

Чепур Мария Дмитриевна¹ — студент,

¹ МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 129–135.

P.V. Nikolenko, M.D. Chepur

SPECTRUM ANALYSIS OF STRESS MEMORY EFFECTS IN ACOUSTIC EMISSION IN COMPOSITES FOR THE GROUND CONTROL PURPOSES

It is discussed how stress memory effects in acoustic emission (Kaiser effect) can be used to control stress state of rock mass. The «memory bearer» is suggested to be composite materials synthesized at laboratory scale rather than rocks. One of the promising lines of development of this method can be new approaches to processing of measurement data. It is proposed to use an integrated spectrum analysis of acoustic emission signals by means of construction of complete spectrograms of loading process. The methods of transformation of load–time curve in order to be synchronous with the spectrograms are described. It is shown that in order to trace features of Kaiser effect, the spectrograms should be subjected to sliding-average smoothing with a rectangular window. Aspects of choosing the window parameters are described. The analysis of the processed spectrogram reveals that the effect of stress memory in the test composites is represented by a burst in acoustic emission activity and, at the same time, by an abrupt change in the spectrum of acoustic events in the frequency band from 130 to 150 kHz. The detected regularity allows pinpointing the moment of Kaiser effect even in very noisy acoustograms.

Key words: Kaiser effect, stress state, rock mass control, spectrum analysis, composite material.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-129-135

AUTHORS

Nikolenko P.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Chepur M.D.¹, Student,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been supported by the Russian Science Foundation, Project No. 17-77-10009.

REFERENCES

1. Kaiser J. *Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen*, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1953, Vol. 24, No. 1, 2, pp. 43–45.

2. Kanagawa T., Hayashi M., Nakasa H. *Estimation of spatial geo-stress in rock samples using Kaiser effect*. Centr. Res. Inst. of Electric Power Ind. (CRIEPI) Report No. 375017. Abiko, Japan, 1976.

3. Kurita K., Fujii N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission. *Geoph. Res. Letts.* 1979. Vol. 6. No. 1. P.9–12.
4. Wang H.-J., Tang L., Ren X.-H., Yang A.-Y., Niu Y. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading, *Rock and Soil Mechanics*, 2014, Vol. 35, Issue 4, pp. 1007–1014.
5. Meng Q., Zhang M. E., Han L., Pu H., Chen Y. Acoustic emission characteristics of red sand-stone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, pp. 1–20.
6. Holcomb D. J., Costin L. S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emission, *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, 1986, Vol. 53, No. 3, pp. 536–544.
7. Hughson D. R., Crawford A. M. Kaiser effect gauging: the influence of confining stress on its response, *Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics, Rotterdam: A. A. Balkema*, 1987, Vol. 2, pp. 981–985.
8. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L. Acoustic emission in composites and application for stress monitoring in in rock masse, *J. of Mining Science*, 2014, Vol. 61, Issue 2. pp. 80–83.
9. Zhang N.-B., Qi Q.-X., Ouyang Z.-H., Li H.-Y., Zhao S.-K., Xu, Z.-J. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2014, Vol. 39, Issue 2, pp. 389–394.
10. Ermolov I. N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* (Theory and practice of ultrasonic control), Moscow, Mashinostroenie, 1981. 240 p.
11. Nikolenko P. V., Tsarikov A. Yu. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 4, pp. 273–278.
12. Kuksenko V. S., Stanchits S. A., Tomilin N. G. *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1983, no 3, pp. 536–543.
13. Kuksenko V. S., Mansurov V. A., Manzhikov B. Ts., Frolov D. I., Stanchits S. A., Inzhevatkin I. E. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*. 1990, no 6, pp. 5.



**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)**

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД
ОСНОВАНИЙ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ МЕКОНГ
(2017, № 6, СБ 11, 8 с.)**

Буй Куок Зунг — аспирант, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

Приведена геолого-географическая характеристика дельты реки Меконг (ДРМ) и показатели физико-механических свойств глинистых горных пород, слагающих естественные основания. Представлены результаты исследования минерального и химического состава глинистых отложений, а также определения их прочностных и деформационных показателей. Отмечена близость характеристик прочности и деформируемости глинистых отложений ДРМ и тонкодисперсных намывных грунтов КМА и Кузбасса. Рекомендуется применять комбинированные зонды МГГУ для определения свойств и состояния глинистых отложений ДРМ с целью последующей оценки устойчивости ограждающих дамб польдерных систем.

Ключевые слова: глинистые минералы, река Меконг, глинистые отложения, намывные грунты, минеральный состав.

**RATIONALE FOR THE USE OF METHOD OF PENETRATION OF THE LOGGING TOOL
TO STUDY THE PROPERTIES AND CONDITION OF THE CLAY ROCKS
OF FOUNDATIONS OF PROTECTIVE STRUCTURES IN THE MEKONG DELTA**

Buj Kuok Zung, Graduate Student, Mining Institute,

National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

Geological and geographical characteristics of the Mekong Delta (DRM) and indicators of physical and mechanical properties of clay rocks forming natural bases are given. The results of the study of the mineral and chemical composition of clay deposits, as well as the determination of their strength and deformation parameters. The proximity of strength and deformability characteristics of clay sediments of DRM and fine-dispersed alluvial soils of KMA and Kuzbass is noted. It is recommended to use MGGU combined probes to determine the properties and state of clay deposits in the HOUSE for the purpose of subsequent assessment of the stability of dams of polder systems.

Key words: clay minerals, Mekong river, clay deposits, alluvial soils, mineral composition.