

05.23.07 ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Сейсмоустойчивость грунтовой плотины Альминского водохранилища

УДК 622.271+624

Волосухин Я.В.

Генеральный директор, Инженерный консалтинговый центр «Безопасность гидротехнических сооружений» (г. Новочеркасск); e-mail: mail@ibgts.ru

Статья получена: 27.11.2019. Рассмотрена: 28.11.2019. Одобрена: 13.12.2019. Опубликовано онлайн: 31.12.2019. ©РИОР

Аннотация. Строительство первого крупного водохранилища на Крымском полуострове севернее населенного пункта Базарчик (ныне Почтовое) на балке Базар-Джилга, впадающей в р. Альма (длина 87,8 км, площадь водосбора 635 км²), было осуществлено в 1925 г. по проекту областного управления водного хозяйства. Объем водохранилища, получившего наименование Альминское (Базар-Джилга), составлял 1,7 млн м³, что позволило оросить 1,8 тыс. га земель. В 1927 г. на Крымском полуострове произошло два катастрофических землетрясения (июньское и сентябрьское) с магнитудами 6,0 и 6,8.

В 1934 г. сдали в эксплуатацию реконструируемый комплекс ГТС Альминского водохранилища. Объем водохранилища составил 6,0 млн м³; высота грунтовой плотины — 20,2 м; длина плотины — 220 м; ширина по гребню 7,45 м.

В 1974–1976 гг. была проведена реконструкция комплекса ГТС Альминского водохранилища. За период эксплуатации Альминского водохранилища нормы сейсмического строительства в СССР и Российской Федерации изменялись 11 раз.

В работе рассмотрены вопросы сейсмоустойчивости грунтовой плотины Альминского водохранилища в соответствии с требованиями СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах», в котором приведены критериальные условия и для эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: грунтовая плотина, земляные откосы, водохранилище, сейсмоустойчивость, безопасность.

Введение. Альминское водохранилище расположено в предгорной зоне Крыма. Климат характеризуется мягкой зимой, засушливый,

SEISMIC STABILITY OF THE SOIL DAM OF THE ALMINSKY RESERVOIR

Yakov Volosukhin

Director General, Engineering and Consulting Centre (ECC) «Hydraulic structures Safety», Novocherkassk; e-mail: mail@ibgts.ru

Manuscript received: 27.11.2019. **Revised:** 28.11.2019. **Accepted:** 13.12.2019. **Published online:** 31.12.2019. ©RIOR

Abstract. Construction of the first large reservoir on the Crimean peninsula north of Bazarchik (now Post Office) on the beam of Bazar-Jilga, which flows into the river Alma (length 87.8 km, catchment area 635 km²), was carried out in 1925 under the project of the regional department of water management. The volume of the reservoir named Alminskoye (Bazar-Jilga) was 1.7 million m³, which allowed the irrigation of 1.8 thousand hectares of land. In 1927 on

the Crimean peninsula there were two catastrophic earthquakes (June and September) with magnitudes 6,0 and 6,8.

In 1934 the reconstructed complex of GTS of the Alminsky reservoir was put into operation. The reservoir volume was 6.0 million m³; Ground dam height — 20,2 m; Dam length — 220 m; Width along the ridge is 7,45 m.

In 1974–1976 the reconstruction of the complex of GTS of the Alminsky reservoir was carried out. During the period of operation of the Almin reservoir, the norms of seismic construction in the USSR and the Russian Federation were changed 11 times.

The issues of seismic stability of the soil dam of the Alminsky reservoir in accordance with the requirements of SP 14.13330.2018 “Construction in seismic areas,” which shows the criterion conditions for the operated hydraulic structures, are considered in the work.

Keywords: soil dam, earth slopes, reservoir, seismic stability, safety.

очень теплый. Зима здесь влажная, лето засушливое [3; 5; 10; 15].

Водосборная площадь бассейна до створа гидроузла составляет 300 км². Питание реки Альма — снеговое, дождевое. Среднегодовой объем годового стока составляет 40,0 млн м³, за половодье (весна) — 3,5 млн м³. Максимальный расчетный расход воды через сооружения гидроузла — 3,0 м³/с. Донный водовыпуск совмещенный с водозабором имеет расход при пропуске расчетного расхода 0,9 м³/с [10; 15].

Альминское водохранилище расположено в гидрогеологической области Горного Крыма. Основными водоносными горизонтами здесь являются горизонты четвертичных аллювиальных и верхнегорских отложений. Четвертичные аллювиальные отложения представлены, в основном, валунно-щебенистыми и гравийно-галечниковыми отложениями.

Грунтовая плотина Альминского водохранилища (рис. 1–3) сложена из суглинка с включениями гравия и включает противофильтрационные конструкции (зуб в основании; противофильтрационный экран в виде призмы из грунта на напорном откосе) [3; 8–10].

В сводах правил прописаны требования для строительства сооружений, в том числе в сейсмоопасных районах. Особое место отводится строительству гидротехнических сооружений в сейсмоактивных территориях [1–3; 10; 14].

Цель исследования — произвести обоснование сейсмостойкости длительно эксплуатируемой грунтовой плотины Альминского водохранилища.

Методы и материалы. Устойчивость откосов грунтовой плотины была проверена по возможным поверхностям сдвига с нахождением

наиболее опасной призмы обрушения, характеризующейся минимальным отношением обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам.



Рис. 2. Вид на плотину со стороны верхнего бьефа

Критерием устойчивости откосов плотины является соблюдение (для наиболее опасной призмы обрушения) неравенства:

$$\gamma_{lc} F \leq (\gamma_c / \gamma_n) R,$$

где F — расчетное значение обобщенного силового воздействия, определяемого с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f (в зависимости от метода расчета устойчивости откосов F — равнодействующая сил или моментов этих сил относительно оси поверхности сдвига);

R — расчетное значение обобщенной несущей способности системы сооружение-основание, определяемое с учетом коэффициента безопасности по грунту γ_g , т.е. обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности;

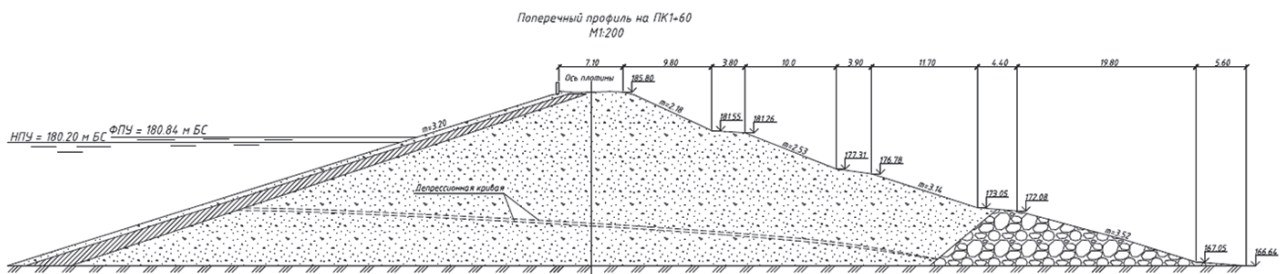


Рис. 1. Поперечный профиль плотины Альминского водохранилища

$\gamma_c, \gamma_n, \gamma_{lc}$ — коэффициенты соответственно условий работы, ответственности сооружения, сочетания нагрузок.



Рис. 3. Гребень грунтовой плотины Альминского водохранилища

При поиске опасной поверхности сдвига использована зависимость для коэффициента устойчивости K_S в виде:

$$K_S = R / F \geq (\gamma_n \gamma_{lc}) / \gamma_c.$$

Числовые значения коэффициентов γ_n и γ_{lc} приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Числовые значения коэффициента γ_n

Класс сооружения	I	II	III	IV
Значение γ_n	1,25	1,20	1,15	1,10

Таблица 2

Числовые значения коэффициента γ_{lc}

Сочетание нагрузок	Основное	Особое	Строительного периода
Значение γ_{lc}	1,00	0,90	0,95

Величина коэффициента γ_c принимается в зависимости от используемого способа расчета, равной 0,95 — инженерные методы расчета, 1,00 — с учетом напряженно-деформированного состояния. Для сооружений IV класса при особом сочетании нагрузок $K_S \geq 1,0$ независимо от величины γ_c . Таким образом, критериальное значение коэффициента устойчивости для сооружений I класса при основном сочетании нагрузок составляет $K_{S1} = 1,32$, при особом сочетании нагрузок $K_{S2} = 1,18$.

Результаты и обсуждение. Землетрясения на Крымском полуострове достаточно частые явления и описаны в научной литературе за период с 63 г. до н.э. до современного периода [4; 6]. В табл. 3 приведены сведения о сильных землетрясениях, имевших место в Крыму в XIX в.

Таблица 3

Сильные землетрясения, имевшие место в Крыму в XIX в.

Время	Место	Балльность землетрясения по MSK-64
1938 (23 января)	Южный берег Крыма (ЮБК)	7
1869 (11 октября)	Судак	7
1872 (апрель)	Феодосия	6–7
1873	Бахчисарай	7
1875 (25 июля)	Севастополь	7

Наиболее значительные землетрясения на Крымском полуострове произошли в 1927 г.

26 июня 1927 г. произошло землетрясение с эпицентром на дне Черного моря. На участке между Ялтой и Алуштой сила его составила 7 баллов. Разрушений было немного, погибших не было [4; 6]. Сейсмологи считают июньское землетрясение в Крыму форшоком события 11 сентября 1927 г.

Максимальное разрушительное 9-балльное землетрясение в Крыму произошло в ночь с 11 на 12 сентября 1927 г. Сила землетрясения в районе Ялты составила 8 баллов; в Севастополе, Симферополе и Алуште — 7 баллов; в Феодосии и Евпатории — 6 баллов; в Керчи — 5 баллов; в Новороссийске и Ростове — 4 балла. В период землетрясения погибло 16 человек, 830 было ранено, в том числе 375 тяжело.

В Ялтинском районе осталось без крова более половины населения. Землетрясение принесло очень существенные убытки для экономики региона и населения (до 50 млн руб. в ценах того периода) [4–6].

Однако описания воздействия землетрясения 11 сентября 1927 г. на гидротехнические сооружения Крыма отсутствуют. Девятибалльное землетрясение 1 сентября 1923 г., произошедшее в Японии, в результате которого погибло 91 тыс. 344 человек, было ранено 65 тыс. 350 человек, а число пострадавших зданий и соору-

жений составило 176 тыс. 442 единицы, хорошо освещено в научной литературе [13].

В работе [13] приведены подробные исследования воздействия землетрясения в Токио на плотины, сооружения водохранилищ, насосные станции, резервуары и другие гидротехнические сооружения.

В табл. 4 приведены сведения о сильных землетрясениях, имевших место в Крыму после 1927 г.

Таблица 4

**Сильные землетрясения,
имевшие место в Крыму после 1927 г.**

Время	Место	Бальность землетрясения по MSK-64
1949 г. (30 августа)	Ялта, ЮБК	6
1957 г. (18 марта)	Севастополь	6
1966 г. (12 июня)	Анапа, Новороссийск, Восточный Крым	6–7
1972 г. (6 августа)	Севастополь	6

Первое в Крыму водохранилище — Альминское — было построено по проекту Крымводхоза в балке Базар-Джилга, заполняется водами реки Альма по каналу длиной 5 км и функционирует уже более 90 лет. При обследованиях в 2015–2017 гг. выполнялись инструментальные и визуальные исследования, которыми устанавливалось состояние основных ГТС Альминского водохранилища. Был выполнен автоматизированный численный расчет устойчивости откосов плотины Альминского водохранилища по программе «Расчет устойчивости земляных откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения» с учетом кривой депрессии в теле сооружения для основного и особого случая нагрузок (с учетом сейсмичности района расположения ГТС) [7–12; 14; 16].

Программа расчета устойчивости земляных откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения разработана для расчета земляных откосов произвольной конфигурации.

Коэффициент запаса устойчивости откоса определяется по следующим трем методам расчета: Метод Г. Крея (иначе — метод А.В. Бишопа), метод профессора К. Терцаги, метод «Весового давления» (метод профессора Р.Р. Чугаева).

Программа позволяет:

- 1) разделить область центров и радиусы, рекомендуемые по методу В.В. Аристовского;
- 2) задать необходимое для расчета количество центров поверхностей скольжения и радиусов;
- 3) разделить наиболее опасную поверхность в автоматизированном режиме расчета;
- 4) выполнить расчет откоса с учетом действия сейсмических сил.

Исходными материалами для расчетов являлись:

- принятый поперечный профиль плотины;
- физико-механические свойства грунтов, слагающих тело и основание плотины;
- действующие нагрузки для основного (при НПУ) и особого (при ФПУ) случаев нагрузки;
- положение кривой депрессии в теле сооружения, полученное по результатам фильтрационных расчетов;
- сейсмичность района расположения ГТС;
- нормативное значение коэффициента запаса устойчивости при основном случае нагрузок $K_{s1} = 1,32$, при особом — $K_{s2} = 1,18$.

Результаты расчетов по определению коэффициентов запаса устойчивости откосов плотины Альминского водохранилища приведены в табл. 5 и 6, расчетные схемы были сделаны для всех вариантов, но в статье для примера показана одна (рис. 4).

Таблица 5

Результаты расчета по определению коэффициента запаса устойчивости Альминского водохранилища

Метод расчета	$K_{s,min}$	$R, м$	$X_0, м$	$Y_0, м$
<i>Верховой откос для основного случая нагрузок</i>				
Г. Крея	1,445	52,11	43,64	111,93
К. Терцаги	1,349	55,22	41,64	112,04
<i>Верховой откос для особого случая нагрузок</i>				
Г. Крея	1,434	52,11	43,64	111,93
К. Терцаги	1,339	55,22	41,64	112,04
Весового давления	1,432	55,22	41,64	112,04
<i>Низовой откос для основного случая нагрузок</i>				
Г. Крея	1,553	59,93	41,00	117,39
К. Терцаги	1,443	59,80	41,00	116,75
Весового давления	1,537	60,15	40,99	117,04
<i>Низовой откос для особого случая нагрузок</i>				
Г. Крея	1,542	59,93	41,00	117,39
К. Терцаги	1,433	59,80	41,00	116,75
Весового давления	1,526	60,15	40,99	117,04

Таблица 6

Сводная таблица полученных коэффициентов запаса устойчивости откосов плотины Альминского водохранилища с учетом расчетной сейсмичности

Метод расчета	Значение коэффициента запаса устойчивости $K_{s,min}$
Верховой откос (основной случай нагрузки)	
Г. Крея	1,445
К. Терцаги	1,349
Весового давления	1,442
Верховой откос (особый случай нагрузки)	
Г. Крея	1,434
К. Терцаги	1,339
Весового давления	1,432
Низовой откос (основной случай нагрузки)	
Г. Крея	1,553
К. Терцаги	1,443
Весового давления	1,537
Низовой откос (особый случай нагрузки)	
Г. Крея	1,542
К. Терцаги	1,433
Весового давления	1,526

Выводы по работе

1. Длительно эксплуатируемый комплекс гидротехнических сооружений Альминского водохранилища относится к объектам чрезвычайно высокой опасности (I класс) и находится под постоянным государственным надзором Крымского управления Ростехнадзора. Для повышения безопасности комплекса ГТС Альминского водохранилища в соответствии с требованиями п. 8.6 СП 14.13330.2018 на нем должен быть организован геодинамический мониторинг напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины, деформационных процессов, происходящих

в сооружении, основании, береговых примыканиях, а также в районе водохранилища.

2. Из результатов натурных исследований комплекса ГТС и расчетов устойчивости следует, что устойчивость откосов грунтовой плотины Альминского водохранилища с учетом положения расчетной кривой депрессии и сейсмичности района расположения ГТС как при НПУ, так и при ФПУ обеспечена.

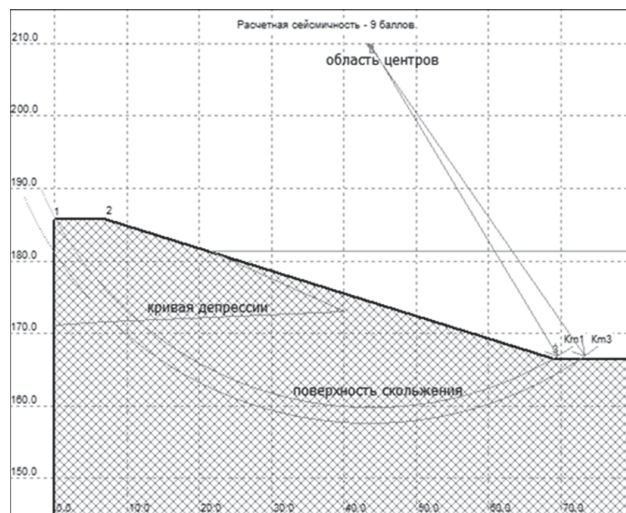


Рис. 4. Расчетная схема к определению коэффициента запаса устойчивости верхового откоса плотины Альминского водохранилища для особого случая нагрузок

3. Для повышения надежности комплекса ГТС Альминского водохранилища службе эксплуатации рекомендуется автоматизировать диагностический контроль фильтрационного режима грунтовой плотины.

4. Общее техническое состояние комплекса ГТС Альминского водохранилища по результатам натурных инструментальных исследований, визуальных наблюдений и численных расчетов оценивается как удовлетворительное.

Литература

- СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*: взамен СП 14.13330.2014: дата введения 2018-11-25 [Текст]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/550565571> (дата обращения: 25.12.2019).
- ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности: введ. впервые: дата введения 2017-09-01 [Текст]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200146265> (дата обращения: 25.12.2019).
- Волосухин Я.В. Обеспечение безопасности водопользования в Республике Крым [Текст] / Я.В. Волосухин, Д.Ю. Наволокин // Водоснабжение и санитарная техника. — 2017. — № 6. — С. 4 — 9.
- Землетрясения в Крыму: история и сейсмическая активность в настоящее время [Текст]. — URL: <https://vplate.ru/krym/zemletryaseniya> (дата обращения: 25.12.2019).

5. Альминская впадина [Текст]. — URL: <https://scicenter.online/geologiya-sssr-sci-center/alminskaya-vpadina-164297.html> (дата обращения: 25.12.2019).
6. Крымские землетрясения [Текст]. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 25.12.2019).
7. Розанов Н.Н. Плотины из грунтовых материалов [Текст] / Н.Н. Розанов. — М.: Стройиздат, 1983. — 296 с.
8. Измерение геометрических параметров плотины Альминского водохранилища геодезическим методом. Отчет о комплексных инженерных изысканиях. Часть I. Инженерно-геодезические изыскания [Текст]. — Ростов н/Д: ИП Андросов А.Ю., 2017.
9. Декларация безопасности гидротехнических сооружений Альминского водохранилища [Текст] / ОАО «Севкагипроводхоз». — Симферополь, 2016.
10. Технический отчет по результатам комплексного анализа (многофакторного обследования) с оценкой прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений Альминского гидроузла [Текст] / Я.В. Волосухин; ИКЦ «Безопасность ГТС». — Новочеркасск, 2017. — 108 с.
11. П 71-2000 ВНИИГ. Рекомендации по диагностическому контролю фильтрационного режима грунтовых плотин: введ. впервые: дата введения III кв. 2000 [Текст]. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812286.pdf> (дата обращения: 25.12.2019).
12. П 72-2000 ВНИИГ. Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах: введ. впервые: дата введения III кв. 2000 [Текст]. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812137.pdf> (дата обращения: 25.12.2019).
13. Цшохер В.О. Антисейсмическое строительство [Текст] / В.О. Цшохер, В.А. Быховский. — М.: Строительство, 1937. — 344 с.
14. Марчук А.И. Степень надежности больших плотин при повышении нормативной сейсмичности [Текст] / А.И. Марчук // Гидротехника XXI век. — 2018. — № 12. — С. 22–25.
15. Иванкова Т.В. Гидроэкологическая безопасность водопользования в бассейне малой реки Альмы Республики Крым [Текст]: монография / Т.В. Иванкова. — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. — 64 с.
16. Стефанишин Д.В. Некоторые теоретические аспекты оценки старения гидротехнических сооружений [Текст] / Д.В. Стефанишин // Гидротехническое строительство. — 1996. — № 9. — С. 21 — 24.

References

1. *SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-7-81*: vzamen SP 14.13330.2014: data vvedeniya 2018-11-25* [SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Loads and impacts. Updated version of SNiP II-7-81*: instead of SP 14.13330.2014: date of introduction 2018-11-25]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/550565571> (accessed 25 December 2019).
2. *GOST R 57546-2017. Zemletryaseniya. Shkala seismicheskoy intensivnosti: vved. v pervyye: data vvedeniya 2017-09-01* [GOST R 57546-2017. Earthquakes. Seismic Intensity Scale: Int. for the first time: introduction date 2017-09-01]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200146265> (accessed 25 December 2019).
3. Volosuhin Ya.V. Obespechenie bezopasnosti vodopol'zovaniya v Respublike Krym [Ensuring the safety of water use in the Republic of Crimea]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment]. 2017, I. 6, pp. 4–9.
4. *Zemletryaseniya v Krymu: istoriya i seismicheskaya aktivnost' v nastoyashchee vremya* [Earthquakes in Crimea: history and seismic activity at present]. Available at: <https://vplate.ru/krym/zemletryaseniya> (accessed 25 December 2019).
5. *Al'minskaya vpadina* [Alminsky depression]. Available at: <https://scicenter.online/geologiya-sssr-sci-center/alminskaya-vpadina-164297.html> (accessed 25 December 2019).
6. *Krymskie zemletryaseniya* [Crimean earthquakes]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (accessed 25 December 2019).
7. *Rozanov N.N. Plotiny iz gruntovykh materialov* [Dams from soil materials]. Moscow: Strojizdat Publ., 1983. 296 p.
8. *Izmerenie geometricheskikh parametrov plotiny Al'minskogo vodohranilishcha geodezicheskim metodom. Otchet o kompleksnykh inzhenernykh izyskaniyakh. Chast' I. Inzhenerno-geodezicheskie izyskaniya* [Measurement of the geometric parameters of the dam of the Alma reservoir by the geodetic method. Integrated Engineering Survey Report. Part I. Engineering and geodetic surveys]. Rostov-on-Don, 2017.
9. *Deklaraciya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij Al'minskogo vodohranilishcha* [Declaration of safety of hydraulic structures of Alma reservoir]. ОАО «Севкагипроводхоз» [OJSC «Севкагипроводхоз»]. Симферополь, 2016.
10. Volosuhin Ya.V. Tekhnicheskij otchet po rezul'tatam kompleksnogo analiza (mnogofaktornogo obsledovaniya) s ocenкой prochnosti, ustojchivosti i ekspluatacionnoj nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij Al'minskogo gidrouzla [Technical report on the results of a comprehensive analysis (multivariate examination) with an assessment of the strength, stability and operational reliability of hydraulic structures of the Alminsky hydroelectric complex]. *IKC «Bezopasnost' GTS»* [ICC «Safety of GTS»]. Novocherkassk, 2017. 108 p.
11. *P 71-2000 VNIIG. Rekomendacii po diagnosticheskomu kontrolyu fil'tracionnogo rezhima gruntovykh plotin: vved. V pervyye* [P 71-2000 VNIIG. Recommendations for the diagnostic control of the filtration regime of soil dams: introduction. for the first time]. 2000. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812286.pdf> (accessed 25 December 2019).
12. *P 72-2000 VNIIG. Rekomendacii po provedeniyu vizual'nykh nablyudenij i obsledovanij na gruntovykh plotinakh* [P 72-2000 VNIIG. Recommendations for visual observations and surveys on soil dams: introduction. for the first time]. 2000. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812137.pdf> (accessed 25 December 2019).
13. Cshoher V.O. *Antisejsmicheskoe stroitel'stvo* [Antiseismic construction]. Moscow: Stroitel'stvo Publ., 1937. 344 p.
14. *Marchuk A.I. Stepen' nadezhnosti bol'shikh plotin pri povyshenii normativnoj sejsmichnosti* [The degree of reliability of large dams with increasing regulatory seismicity]. *Gidrotekhnika XXI vek* [Hydrotechnics XXI century]. 2018, I. 12, pp. 22–25.
15. *Ivanova T.V. Gidroekologicheskaya bezopasnost' vodopol'zovaniya v bassejne maloj reki Al'my Respubliki Krym* [Hydroecological safety of water use in the basin of the small river Alma of the Republic of Crimea]. Rostov-on-Don: YuNC RAN Publ., 2019. 64 p.
16. *Stefanishin D.V. Nekotorye teoreticheskie aspekty ocenki stareniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Some theoretical aspects of assessing the aging of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction]. 1996, I. 9, pp. 21–24.