

УДК 502/504:69.035.4:539.31

Д. Т. БАУТДИНОВ, У. И. АТАБИЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ НАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

В статье проведен параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи напорного гидротехнического туннеля круговой формы сечения от внутреннего напора воды, которые широко распространены в области гидротехнического строительства и являются одними из самых сложных, трудоемких и дорогих типов сооружений, входящих в состав основных сооружений гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения. В качестве водопропускных и водопроводящих сооружений их строят под землей в тех случаях, когда открытая выемка грунтов невозможна или неэкономична, когда трасса туннеля проходит через густонаселенную или густо застроенную местность, или на ней возможны оползни, осыпи, камнепады. Определены тангенциальные напряжения по контуру выработки гидротехнического туннеля при различных отношениях модулей деформаций и коэффициентов Пуассона, позволяющие оценивать прочность грунтового массива при различных глубинах заложения туннеля. Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком, трансверсально-изотропном скальном грунте, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Так как решение такой задачи невозможно аналитическими методами анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип элемента, пригодного для расчета на основе решения тестовой задачи. В качестве тестовой задачи для расчета туннеля круговой формы сечения на внутренний напор воды была рассмотрена задача Ламе для толстостенного изотропного цилиндра, при равномерном внешнем и внутреннем давлении.

Трансверсально-изотропная среда, теория упругости, плоская деформация, модуль деформаций, коэффициент Пуассона.

Введение. Подземные гидротехнические сооружения широко распространены в области гидротехнического и мелиоративного строительства и одновременно являются одними из самых сложных и дорогих типов основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения.

Гидротехнические туннели глубокого заложения могут возводиться с обделкой и без нее, при проходке в слаботрещиноватых скальных не размываемых грунтах. Применение гидротехнических туннелей без обделки позволяет снизить их стоимость на 20...30 % и сократить сроки строительства на 10...15 %.

При проектировании гидротехнических туннелей глубокого заложения, проходящих в анизотропных грунтах с отношением модулей деформаций в разных направлениях более чем 1,4, расчет следует проводить с учетом анизотропии [1].

По деформационности и прочности в различных направлениях массивы скальных грунтов следует считать изотропными при коэффициенте анизотропии не более 1,5. Под коэффициентом анизотропии понимают отношение большего значения характеристики к меньшему в двух заданных направлениях [2].

Эти требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с сильно выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Целью данной работы является проведение параметрического анализа напряженного состояния анизотропного скального грунта с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях от внутреннего напора воды на контуре выработки круговой формы сечения, используя модель трансверсально-изотропной среды.

Материалы и методы исследования. Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком, трансверсально-изотропном скальном грунте, можно свести к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Так как решение такой задачи невозможно аналитическими методами анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип элемента, пригодного для расчета на основе решения тестовой задачи.

В качестве тестовой задачи для расчета туннеля круговой формы сечения на внутренний напор воды была рассмотрена задача Ламе для толстостенного изотропного цилиндра, при равномерном внешнем и внутреннем давлении (рис. 1).

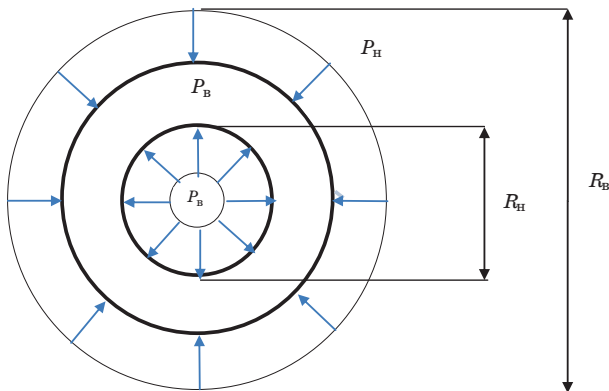


Рис. 1. К задаче Ламе (тестовая задача): R_b – внешний радиус; R_n – внутренний радиус; P_b – внутреннее давление; P_n – внешнее давление

Выражения для радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений, согласно решению Ламе, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_b^2 P_b - R_n^2 P_n}{R_n^2 - R_b^2} - \frac{R_b^2 R_n^2 (p_b - p_n)}{R_n^2 - R_b^2} \cdot \frac{1}{r^2}; \\ \sigma_\theta &= \frac{R_b^2 P_b - R_n^2 P_n}{R_n^2 - R_b^2} + \frac{R_b^2 R_n^2 (p_b - p_n)}{R_n^2 - R_b^2} \cdot \frac{1}{r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Полагая в данном случае в (1) и (2) $R_n = \infty$, $P_n = 0$, $P_b = 1$, раскрывая неопределенность, получим напряжения на контуре туннеля круговой формы сечения от внутреннего напора воды равного единице:

$$\sigma_\theta = 1; \sigma_r = -1.$$

Результаты расчетов с использованием программного комплекса ANSYS показали хорошее соответствие с результатами тестовой задачи.

Расчетная схема, моделирующая гидротехнический туннель со значительной глубиной заложения без обделки с круговой формой сечения, проходящей в скальных грунтах с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях с учетом геометрической и физической симметрии, представлена на рисунке 2. Размеры выбранной расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (критерий М. И. Фролова) [3].

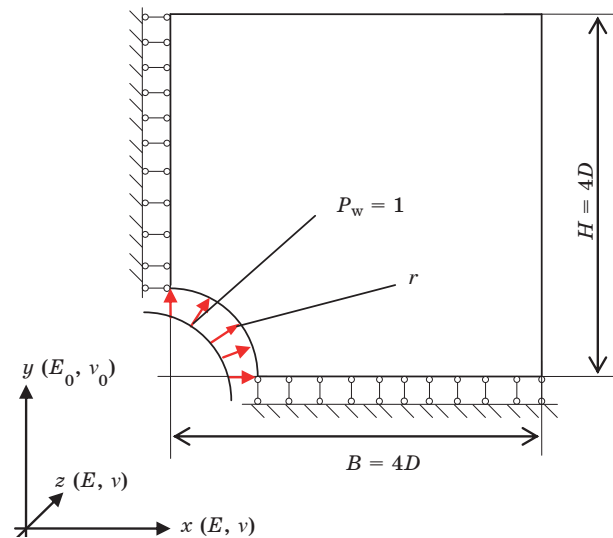


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая внутренний напор воды на туннель (по модели трансверсально-изотропной среды)

Для удобства вычислений, согласно принципу суперпозиции линейной теории упругости, напряженное состояние туннеля предварительно определялось от единичной нагрузки, моделирующей внутренний напор воды. Затем, умножая полученные результаты на реальную величину напора, можно получить истинное напряженное состояние.

При проведении расчетов задавались различные значения коэффициента анизотропии $\alpha = E/E_0$ от 1 до 3 с шагом 0,5 и отношения ν_0/ν от 1 до 3,5 с шагом 0,5 при $\nu = 0,1$ (здесь E и E_0 , ν и ν_0 – модули деформации и коэффициенты Пуассона в изотропном и трансверсальном направлениях соответственно). В координатных

индексах эти параметры соответствуют:

$$E = E_x = E_z, E_y = E_0, \nu = \nu_{xz} = \nu_{zx}, \nu_0 = \nu_{xy}.$$

Результаты исследований. Результаты расчета на единичный внутренний напор воды в гидротехническом туннеле без обделки, проходящем в трансверсально-изотропном скальном грунте при $p_w = 1$ показаны ниже.

Для оценки влияния анизотропии свойств грунтового массива на напряженное состояние туннеля на рисунке 3 приведена эпюра относительных окружных напряжений η на контуре выработки круговой формы для изотропной среды. На рисунке 4 приведена эпюра относительных тангенциальных напряжений при $E/E_0 = 2, \nu_0/\nu = 3,5$; для трансверсально-изотропной среды.

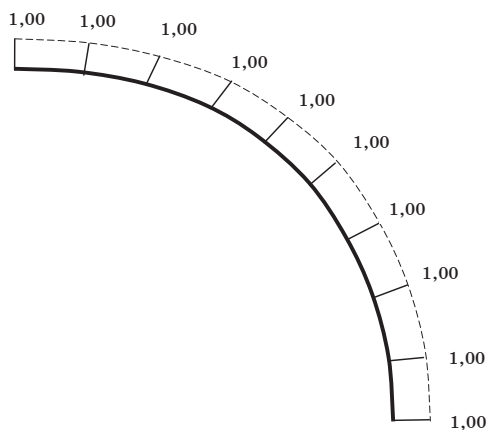


Рис. 3. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от внутреннего напора воды для изотропной среды ($\nu = 0,1$)

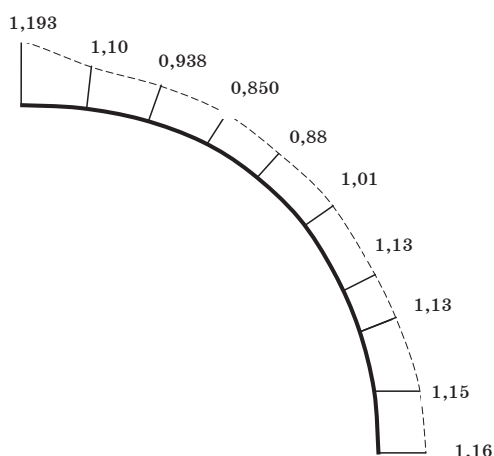


Рис. 4. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от внутреннего напора воды для изотропной среды для трансверсально-изотропной среды ($E/E_0 = 2, \nu_0/\nu = 3,5$)

Как видно из рисунка 4, наиболее опасны для скального грунта относительные тангенциальные растягивающие напряжения, локализующиеся в верхней и в нижней (в силу симметрии) частях выработки, увеличиваются по сравнению с напряжениями в изотропной среде. Также в некоторых сечениях контура круговой выработки растягивающие напряжения незначительно уменьшаются относительно напряжений в изотропной среде.

При отношении $E/E_0 = 2, \nu_0/\nu = 3,5$ наибольшие растягивающие напряжения в верхней части выработки равны $\eta_+^{\max} = 1,193$, а в боковой части равны $\eta_+^{\max} = 1,16$. При дальнейшем увеличении отношений модулей деформаций и коэффициентов Пуассона растягивающие напряжения в верхнем и боковом сечении выработки возрастают по сравнению с напряжениями в изотропной среде.

В таблицах 1 и 2 представлены значения относительных тангенциальных напряжений в верхнем и в боковом сечении выработки круговой формы от внутреннего напора воды в зависимости от отношений упругих характеристик.

Как видно в таблице 1, в диапазоне E/E_0 от 1 до 3 и ν_0/ν от 1 до 2 (с шагом 0,5) напряжения на контуре выработки практически не отличаются от напряжений в изотропной среде. Также, при расчете напряжений по контуру туннеля кругового сечения от внутреннего напора воды E/E_0 от 1 до 3 и ν_0/ν от 2 до 3,5 (с шагом 0,5) которые значительно изменяются относительно изотропной среды.

Таблица 1

Относительные тангенциальные напряжения в верхнем сечении выработки круговой формы от внутреннего напора воды в зависимости от отношений упругих характеристик

Коэффициент анизотропии	Соотношение коэффициентов Пуассона ν_0/ν						
	E/E_0	1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	1	1,001	1,002	1,005	1,01	1,015	
1,5	1,001	1,001	1,01	1,017	1,028	1,041	
2	1,004	1,009	1,019	1,034	1,052	1,076	
2,5	1,006	1,016	1,032	1,054	1,082	1,12	
3	1,01	1,024	1,046	1,078	1,119	1,171	

Таблица 2
Относительные тангенциальные напряжения в боковом сечении выработки круговой формы от внутреннего давления воды в зависимости от отношений упругих характеристик

Коэффициент анизотропии	Соотношение коэффициентов Пуассона ν_0/ν					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Е/Е ₀	1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	1	1	1,003	1,006	1,01	1,017
1,5	1	1,002	1,007	1,014	1,024	1,036
2	1,001	1,005	1,013	1,024	1,04	1,061
2,5	1,002	1,008	1,02	1,036	1,059	1,091
3	1,003	1,012	1,027	1,049	1,081	1,126

Авторы статьи рассмотрели совместное действие внутреннего напора воды и собственного веса грунта на напорный туннель без обделки круговой формы сечения. Анализ напряженного состояния

туннеля кругового сечения на собственный вес грунта представлен в работе [4]. Согласно работе [4] относительные окружные напряжения на контуре выработки при ($\nu = 0,1$), представлены в таблице 3 в зависимости от номера сечения контура выработки (рис. 5).

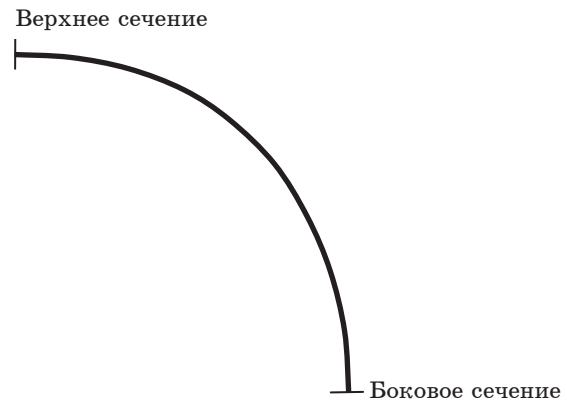


Рис. 5. Обозначение сечений контура круговой выработки

Таблица 3
Значения относительных тангенциальных напряжений η на контуре выработки круговой формы от собственного веса грунта в зависимости от соотношений упругих характеристик в ортогональных направлениях при $\nu = 0,1$ [1]

Коэффициент анизотропии	Номер/сечения	Соотношение коэффициентов Пуассона ν_0/ν					
		1	1,5	2	2,5	3	3,5
Е/Е ₀	Номер/сечения	1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	Верхнее Боковое	0,670 -2,899	0,497 -2,857	0,322 -2,817	0,144 -2,780	-0,048 -2,745	-0,221 -2,712
1,5	Верхнее Боковое	0,851 -2,737	0,667 -2,700	0,481 -2,664	0,294 -2,630	0,106 -2,597	-0,094 -2,565
2	Верхнее Боковое	0,992 -2,638	0,799 -2,604	0,606 -2,572	0,410 -2,541	0,214 -2,510	0,021 -2,480
2,5	Верхнее Боковое	1,108 -2,570	0,909 -2,539	0,708 -2,509	0,506 -2,480	0,302 -2,451	0,099 -2,424
3	Верхнее Боковое	1,207 -2,520	1,002 -2,491	0,795 -2,463	0,587 -2,436	0,378 -2,409	0,168 -2,383

Умножая относительные напряжения от внутреннего напора воды на величину реального напора, относительные напряжения от собственного веса грунта на реальную глубину заложения туннеля, а затем (в силу линейности решаемой задачи), суперпозируя результаты, можно получить истинные значения окружных напряжений на контуре выработки от совместного действия внутреннего напора воды и собственного веса грунта.

Для примера (таблица 4) авторами статьи рассмотрены:

- глубина заложения туннеля $H = 100$ м;
- реальный напор воды $H_w = 100$ м;
- удельный вес грунта $\gamma_{гр} = 25$ кН/м³;
- удельный вес воды $\gamma_w = 10$ кН/м³.

Тогда:

$$\Sigma_0 = H(P_w \gamma_w + \gamma_{гр} P_{гр}). \tag{2}$$

Результаты расчета для верхнего и бокового сечения круговой выработки при совместном действии представлены в таблице 3.

Коэффициент анизотропии	Номер сечения	Соотношение коэффициентов Пуассона ν_0/ν					
		1	1,5	2	2,5	3	3,5
E/E_0							
1	Верхнее Боковое	2665,00 -6257,50	2233,5 -6153,0	1797,0 -6050,0	1355,0 -5954,0	879,9 -5863,0	452,35 -5773,00
1,5	Верхнее Боковое	3118,49 -5852,50	2658,5 -5758,0	2202,4 -5663,0	1741,8 -5571,0	1282,7 -5479,0	795,59 -5387,00
2	Верхнее Боковое	3473,96 -5604,01	2996,4 -5515,0	2523,8 -5427,0	2048,7 -5339,0	1576,5 -5245,0	1117,70 -5150,00
2,5	Верхнее Боковое	3765,94 -5433,02	3278,3 -5350,0	2791,7 -5263,0	2308,5 -5174,0	1826,2 -5079,0	1356,30 -4980,00
3	Верхнее Боковое	4017,40 -5307,03	3518,8 -522,0	3023,0 -5141,0	2534,7 -5051,0	2052,8 -4952,0	1579,30 -4843,00

Выводы

Результаты параметрического анализа напряженного состояния скального грунта в окрестности выработки гидротехнического туннеля круговой формы сечения показывают, что на напряженное состояние оказывает влияние анизотропия упругих свойств скального массива. Следовательно, при проектировании подземных сооружений необходимо более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, уделяя особое внимание упругим характеристикам.

Библиографический список

1. СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 19 с.
2. СНиП 2.02.02-85*. Основания гидротехнических сооружений. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 45 с.
3. Лехницкий С. Г. Теория упругости ани-

зотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

Материал поступил в редакцию 27.01.2016.

Сведения об авторах

Баутдинов Дамир Тахирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая и строительная механика»; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; тел.: +7 (499) 976-33-44; e-mail: damir.tt1@mail.ru.

Атабиев Умар Исхакович, инженер, аспирант кафедры «Гидротехнические сооружения», ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44; тел.: +7 (499) 976-33-44; +7 (499) 976-00-30; +7 (499) 976-04-28; e-mail: a_omar@mail.ru.

D. T. BAUTDINOV, U. I. ATABIEV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

STRESSED STATE OF THE TRANSVERSALLY ISOTROPIC ROCKS CLOSE TO A HEAD HYDROTECHNICAL TUNNEL OF A CIRCULAR FORM SECTION

In the article there is given a parametric analysis of the stressed state of the transversely isotropic rock near the pressurized hydraulic tunnel of circular cross-section shape from the inner water pressure which are prevalent in the field of hydraulic engineering construction and are one of the most complex, effortful and expensive types of facilities that are part of the main structures of waterworks, irrigation and drainage and water supply systems. As culvert and water conveyance structures they are built underground in those cases where open excavation of soils is not possible or not economical, when the tunnel route passes through densely populated or densely built-up area or where there are possible landslides, slide-rocks, rockslides. There are determined tangential stresses on the contour of the hydro-technical tunnel making at different ratios of deformation modulus and Poisson's ratios, allowing estimate the strength of the soil mass at various depths of the tunnel laying. Calculation of the hydro technical tunnel of a great length laid in the hard, transversely isotropic rocks is reduced to the problem of plane deformation of the elasticity theory for the transversally isotropic medium containing a tunnel output. As the solution of such a task is impossible by analytical methods the stressed state analysis was performed by the finite element method using the ANSYS software. Preliminarily there were determined dimensions and type of the element suitable for calculations on the basis of the test problem solution. As a test problem for the calculation of the tunnel of a circular form section on the internal water pressure there was used the Lamé problem for isotropic thick-walled cylinder under uniform external and internal pressure.

Трансверсально-изотропная среда, теория упругости, плоская деформация, модуль деформаций, коэффициент Пуассона.

References

1. Tunneli gydrotehnicheskiye. SNiP 2.06.09-84. – М.: Gosstroy SSSR, 1985. – 19 s.
2. Osnovaniya gydrotehnicheskikh sooruzhenij. SNiP 2.02.02-85*. – М.: Gosstroy SSSR, 1985. – 45 s.
3. Lekhnitsky S. G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela. – М.: Nauka, 1977. – 416 s.

Received on 27.01.2016.

Information about the authors

Bautdinov Damir Takhirovich, candidate of technical sciences, senior lecturer

of the chair «Technical and structural mechanics»; FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550 Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; tel. .: +7(499)976-33-44; e- mail: damir.tt1@mail.ru.

Atabiev Umar Iskhakovich, engineer, post graduate of the chair «Hydraulic structures», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550 Moscow, ul. Boljshaya Academicheskaya, 44; tel. .: +7(499)976-33-44; +7(499)976-00-30; +7(499)976-04-28; e-mail: a_omar@mail.ru.

УДК 502/504:628.113:551.444:628.3

А. В. ЕВГРАФОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

И. М. ЕВГРАФОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ИСТОЩЕНИЯ ПРИ ЗОЛОТОДОБЫЧЕ ЗАКРЫТЫМ СПОСОБОМ

В работе предложены мероприятия по охране гидросферы при развитии золотодобывающего комплекса месторождения «Биркачан» Магаданской области. Установлено, что основная нагрузка на гидросферу осуществляется посредством водоотведения. Основные виды сточных вод при данном виде деятельности: хозяйственно-бытовые; поверхностные; карьерные и шахтные. Хозяйственно-бытовые воды наносят минимальный вред окружающей среде ввиду малого расхода и очистки по требуемых норм. Поверхностный сток формируется на двух участках месторождения, отводится и очищается в отстойнике карьерных вод. Выявлено, что в период отработки месторождения подземным способом в выработанное пространство карьера поступают карьерные воды, образованные ранее при открытом способе, поверхностный сток с прилегающей территории, подземный водоприток, шахтные воды. Данные воды аккумулируются в водосборнике карьерных вод и далее перекачиваются на поверхность в отстойник. Химический состав карьерных вод обусловлен качеством атмосферных осадков и подземных вод. Содержание загрязняющих веществ в подземных водах не превышает ПДК для хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного водопользования. В карьерных водах превышены концентрации взвешенных веществ и нефтепродуктов.

Охрана окружающей среды, экологический мониторинг, сточные воды, золотодобыча, горные выработки.

Введение. При развитии известных месторождений полезных ископаемых встает вопрос по охране и рациональному использованию водных ресурсов, в связи с чем, выполненные исследования для

месторождения «Биркачан» являются актуальными. Месторождение расположено в Северо-Эвенском районе Магаданской области, в 360 км севернее районного центра п. Эвенск. По состоянию на