

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В ОТРАБОТАННОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

СТУДЕНОК Г. А.

*Буровзрывная подготовка горной массы с использованием взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры приводит к загрязнению дренажных вод горных предприятий соединениями азота (аммонийная, нитритная и нитратная формы азота). Сброс таких вод в водные объекты наносит им значительный экологический ущерб и приводит крупные горные предприятия к многомиллионным платежам за нанесение вреда водным ресурсам. В статье с позиций геоэкологии обоснована возможность и приведены результаты реализации технологии очистки дренажных вод крупного горного предприятия от соединений азота за счет микробиологической нитрификации путем их подачи и выдержки в частично затопленной отработанной горной выработке со сложившейся экосистемой. Рассмотрены горнотехнические условия и геотехнологические параметры отработанной горной выработки, обеспечивающие промышленную и экологическую безопасность описанной технологии.*

**Ключевые слова:** геотехнология; геоэкология; очистка; соединения азота; отработанная горная выработка.

Одним из экологических аспектов производственной деятельности горных предприятий, связанной с буровзрывной подготовкой горной массы, является применение промышленных взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры (нитрат аммония  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Аммиачно-селитренные взрывчатые вещества (аммиачно-селитренные ВВ) в настоящее время получили широкое распространение в горной промышленности, что обусловлено доступностью и невысокой стоимостью исходного сырья для производства данных типов взрывчатых веществ.

Применение промышленных аммиачно-селитренных ВВ на карьерах является источником загрязнения дренажных вод, откачиваемых при осушении карьерного поля, соединениями азота (ионы аммония, нитрит-ионы и нитрат-ионы). Поступление соединений азота в дренажные воды при ведении взрывных работ приводит в свою очередь к существенному превышению допустимого уровня их содержания в поверхностных и подземных водах, вызывая загрязнение водных объектов при сбросе в них дренажных вод [1–3].

Вследствие этого возникает необходимость выбора и обоснования технологии очистки дренажных карьерных вод, загрязненных соединениями азота, с учетом не только природоохранных требований, но и технико-экономических возможностей конкретного горного предприятия. При этом основные проблемы, касающиеся ужесточения природоохранных требований, связаны с наличием в сбрасываемых дренажных водах наиболее токсичных соединений азота (ионов аммония

и нитрит-ионов), для которых установлены достаточно жесткие требования по их содержанию в водных объектах (*Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (утв. приказом Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. № 20); Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03*):

– ионы аммония – 0,4 мг/дм<sup>3</sup> (водоемы рыбохозяйственного назначения) и 3,3 мг/дм<sup>3</sup> (водоемы хозяйственно-питьевого назначения);

– нитрит-ионы – 0,08 мг/дм<sup>3</sup> (водоемы рыбохозяйственного назначения) и 2,6 мг/дм<sup>3</sup> (водоемы хозяйственно-питьевого назначения).

Выполненный анализ применяемых в настоящее время методов и технологий для очистки сточных вод от соединений азота показывает, что комплексная очистка возможна только с применением биологических методов очистки, реализуемых на специальных объектах капитального строительства (станциях биологической очистки) [4, 5]. Вместе с тем очистка дренажных вод на станциях биологической очистки для условий горных предприятий требует высоких капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с большими объемами очищаемых дренажных вод, что не всегда возможно с учетом экономических возможностей горного предприятия.

Для соединений азота в водных объектах гидросферы характерен биогеохимический круговорот, приводящий к трансформации наиболее токсичных форм аммонийного (ионы NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) и нитритного (ионы NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) азота в нитратный азот (ионы NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Образовавшиеся в результате процесса микробиологической нитрификации ионы нитрата используются фитопланктонными организмами и бактериями для синтеза азотсодержащих клеточных компонентов (ассимиляционная нитратредукция).

Концентрация ионов аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) в природных водах зависит от насыщенности кислородом и величины pH, для многих рек и водохранилищ эта величина составляет  $n \cdot 10^{-1}$  мг/дм<sup>3</sup>, для нитрит-ионов (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) – от  $n \cdot 10^{-3}$  до  $n \cdot 10^{-2}$  мг/дм<sup>3</sup>, для нитрат-ионов (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) – от  $n \cdot 10^{-3}$  до  $n \cdot 10^{-1}$  [6].

Экологическая опасность для водоемов при поступлении в них соединений азота связана:

– с токсичностью ионов аммония и нитрит-ионов для гидробионтов, главным образом рыб (водоемы рыбохозяйственной категории) и человека (водоемы хозяйственно-питьевой категории);

– с процессом эвтрофикации водоемов, приводящим к повышению уровня первичной продукции водоемов (фитопланктон) благодаря увеличению в них концентрации биогенных элементов (нитратный азот); повышение до определенного уровня первичной продукции создает основу для ухудшения качества воды за счет ее «цветения», уменьшения прозрачности и содержания в ней кислорода, что приводит к замору и гибели рыбы и др. гидробионтов.

Перспективным и экономически выгодным для очистки сточных вод от соединений азота является применение технологии очистки с использованием биоинженерных сооружений, принцип работы которых основан на естественных биологических процессах, протекающих в гидроэкосистемах. К ним относятся различные типы биологических прудов и ботанических площадок с водной растительностью (биолато) [7].

Распространение данной технологии наблюдается как в странах Европейского Союза, так и в Российской Федерации. При эксплуатации биоинженерных соору-

жений очистка сточных вод от аммонийного и нитритного азота происходит за счет их микробиологической нитрификации, а нитратный азот удаляется из воды за счет его поглощения водной растительностью.

При создании и эксплуатации биоинженерных сооружений для очистки сточных вод необходимо соблюдение следующих условий:

- биоинженерное сооружение (техногенный биогеохимический барьер) проектируется под конкретную задачу очистки сточных вод (вид и концентрация загрязняющих веществ, степень требуемой очистки, расход воды);

- время пребывания загрязненной воды в биоинженерном сооружении должно обеспечивать необходимую степень очистки от загрязняющих веществ при максимальном использовании объема и площади биоинженерного сооружения;

- наличие системы постоянного контроля эффективности работы биоинженерного сооружения;

- в процессе эксплуатации биоинженерного сооружения необходимо обеспечивать условия для предотвращения вторичного загрязнения воды продуктами трансформации задержанных загрязняющих веществ.

**Химический состав воды в затопленной части карьера,  
г/м<sup>3</sup> (мг/дм<sup>3</sup>)**

Контролируемый показатель	Содержание в затопленной части карьера	ПДК <sub>хл</sub> /ПДК <sub>рх</sub>
Сухой остаток	546	1000,0
Железо (общее)	0,04	0,3/0,1
Хлорид-ион (Cl <sup>-</sup> )	48,4	350/300
Сульфат-ион (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	80,0	500/100
Ион аммония (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,2	1,5/0,5
Нитрит-ион (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,24	3,3/0,08
Нитрат-ион (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	53,5	45,0/40,0
Нефтепродукты	0,02	0,3/0,05
Медь	0,002	1,0/0,001
Цинк	0,009	1,0/0,01

При создании и применении биоинженерных сооружений необходимо наличие достаточной площади земельного отвода для их организации и строительства, чтобы обеспечить необходимое время для протекания процесса микробиологической нитрификации и последующей ассимиляции нитратного азота. Другой особенностью эксплуатации биоинженерных сооружений при наличии высшей водной растительности является сезонность их функционирования только в теплый период года.

В условиях горных предприятий в качестве биоинженерных сооружений перспективным и экономически целесообразным вариантом является использование частично затопленных отработанных горных выработок. При оценке возможности использования частично затопленной отработанной горной выработки для очистки дренажных вод следует учитывать наличие в ней сформированной экосистемы, поскольку очистка дренажных вод от соединений азота будет происходить в результате микробиологического процесса нитрификации аммонийного и нитритного азота с последующей ассимиляцией нитратного азота гидробионтами. Формирование устойчивой экологической системы в затопленных горных выработках при отсутствии токсичных загрязняющих веществ происходит в течение нескольких лет [8].

Решение по использованию отработанного карьера 1-2 для очистки дренажных вод действующего карьера «Центральный» ОАО «Ураласбест» было принято по результатам специальных исследовательских работ, включавших:

– гидрохимические исследования условий формирования существующего химического состава воды в затопленной части отработанного карьера;

– гидрогеологические исследования, обосновывающие предельный уровень заполнения карьера дренажными водами, который обеспечивает сохранение существующего гидрологического и гидрохимического режима прилегающей территории и расположенных на ней объектов (действующие водозаборные скважины и природные водные объекты);

– геомеханические исследования и инженерно-геологические изыскания для определения устойчивости бортов карьера при заполнении его дренажными водами.

Результаты гидрохимических исследований условий формирования существующего химического состава воды в затопленной части карьера (таблица) показали отсутствие в воде загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих нормативы ПДК<sub>хп</sub> для водоемов хозяйственно-питьевого назначения, за исключением незначительного превышения по ионам нитрата (в 1,2 раза). Нормативы ПДК<sub>рх</sub> для рыбохозяйственных водоемов были превышены только по ионам нитрита (в 3 раза) и нитрата (в 1,3 раза) в связи с более низкими их значениями по сравнению с нормативами для водоемов хозяйственно-питьевого назначения.

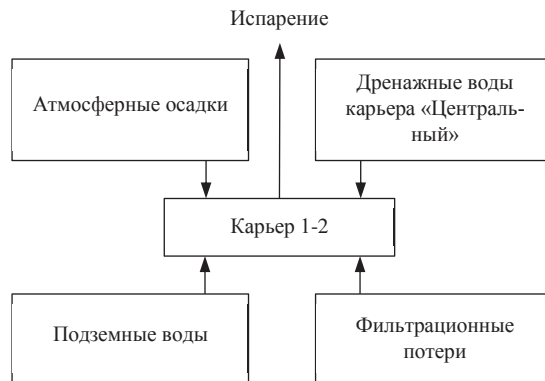


Рис. 1. Принципиальная схема водного баланса карьера при заполнении его дренажными водами карьера «Центральный» ОАО «Ураласбест»

Максимально возможный рабочий объем заполнения карьера дренажными водами был определен в результате гидрогеологических исследований, инженерно-геодезических и инженерно-гидрометеорологических изысканий. Для оценки времени достижения предельной отметки уровня воды в карьере была разработана математическая модель водного баланса карьера с учетом природных и техногенных факторов (очищаемых дренажных вод, атмосферных осадков и подземных вод, потерь на фильтрацию и испарение). Принципиальная схема водного баланса карьера 1-2 при заполнении его дренажными водами действующего карьера «Центральный» ОАО «Ураласбест» приведена на рис. 1.

Для установления зависимости динамики изменения уровня воды в карьере 1-2 при его эксплуатации в системе очистки дренажных вод была разработана трехмерная математическая модель карьера с использованием программного комплекса Golden Software Surfer (версия 9). В качестве исходных данных для построения трехмерной модели карьера использовались данные выполненных инженерно-геодезических изысканий.

При использовании отработанного карьера в качестве биоинженерного сооружения для очистки дренажных вод от соединений азота была организована система постоянного мониторинга химического состава воды в затопленной части карьера для контроля эффективности очистки (рис. 2).

Мониторинговые наблюдения проводились в теплый период года (апрель–октябрь) с одновременными замерами уровня воды в карьере. Отбор проб воды осуществлялся в девяти точках из поверхностного слоя глубиной до 5 м, что соответствовало годовому увеличению уровня заполнения карьера при подаче в него поступающих на очистку дренажных вод.

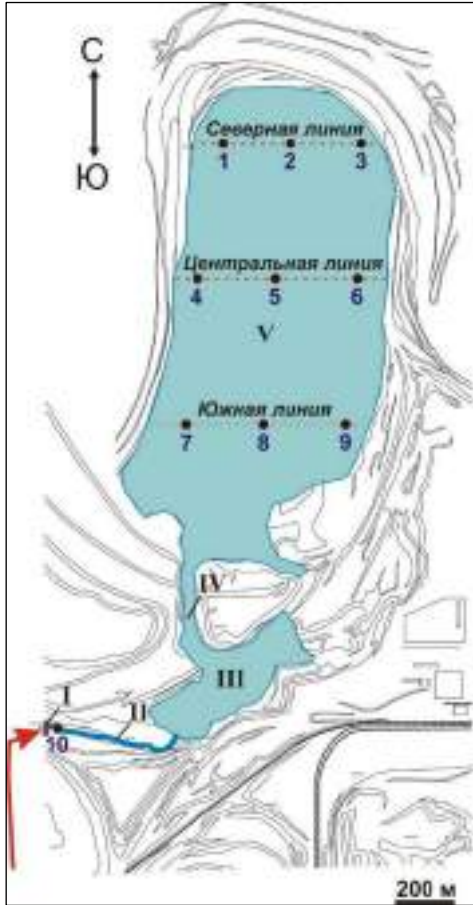


Рис. 2. Схема организации системы мониторинга для контроля эффективности очистки поступающих дренажных вод от соединений азота: I – место подачи дренажных вод; II – русло ручья дренажных вод; III – карьер «Северный»; IV – каньон-образная перемычка; V – карьер 1-2

зирования как одного из инструментов экологического менеджмента показана, например, в статье [9].

Для нитратного азота не наблюдается значительного увеличения его содержания по сравнению с поступающими дренажными водами. Это объясняется тем, что нитратный азот, образующийся в процессе нитрификации аммонийного и нитритного азота, ассимилируется (поглощается) водной растительностью.

Анализ практических результатов использования отработанной горной выработки для очистки дренажных вод от соединений азота показал, что стабилизация параметров очистки дренажных вод от соединений азота происходит

Экспериментальное заполнение отработанной горной выработки дренажными водами происходило в течение 2014 г. Результаты мониторинговых наблюдений за концентрациями соединений азота в отработанной горной выработке подтвердили первоначальное предположение о возможности успешной очистки дренажных вод от аммонийного и нитритного азота за счет микробиологической нитрификации. В 2015–2017 гг. заполнение было продолжено и будет продолжаться до достижения предельного уровня +215,0 м (ориентировочно – конец 2021 г.)

Анализ практических результатов эксплуатации отработанной горной выработки в условиях ОАО «Ураласбест» за период 2014–2017 гг. показывает, что достигаемая эффективность очистки поступающих в нее дренажных вод, загрязненных соединениями азота, составляет для аммонийного и нитритного азота более 90 % (рис. 3). При этом следует отметить, что эффективность очистки в целом стабилизировалась и поддается, таким образом, достоверному прогнозированию с учетом определенной по результатам мониторинга скорости нитрификации 0,25–0,29 г/(м<sup>3</sup>·сут). Важность прогно-

на второй год после начала ее заполнения поступающими на очистку дренажными водами (рис. 3).

Наблюдаемый в 2014 г. период установления параметров процесса нитрификации (микробиологическое окисление аммонийного и нитритного азота) связан с адаптацией в первую очередь нитрифицирующих бактерий к химическому составу дренажных вод по соединениям азота.

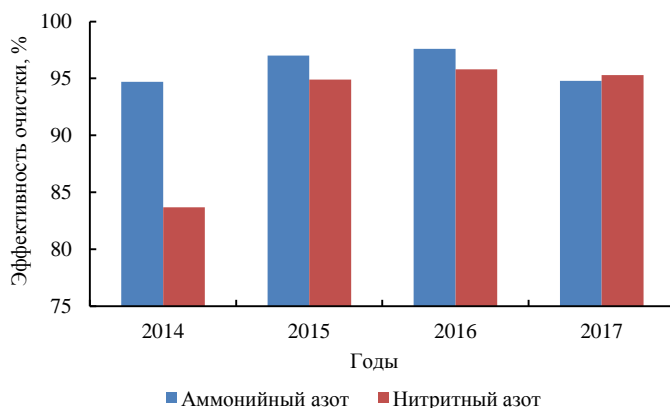


Рис. 3. Эффективность очистки дренажных вод от аммонийного и нитритного азота (ионы аммония и нитрит-ионы) в отработанной горной выработке

В результате при определении рабочего объема отработанной горной выработки необходимо учитывать первоначальный адаптационный период эксплуатации, при котором происходит накопление дренажных вод и стабилизация параметров процессов микробиологической нитрификации. Длительность адаптационного периода будет зависеть от конкретных условий эксплуатации отработанной горной выработки и должна устанавливаться по результатам мониторинговых наблюдений.

Полученные практические результаты очистки дренажных вод от соединений азота в условиях ОАО «Ураласбест» с использованием отработанного и затопляемого естественным путем (атмосферные осадки и подземные воды) карьера позволяют обосновать условия и перспективы применения данной технологии и на других горных предприятиях для решения задачи очистки дренажных вод, загрязненных соединениями азота в результате ведения буровзрывных работ.

Для оценки возможности использования отработанной горной выработки для очистки дренажных вод от соединений азота необходимо учитывать следующие факторы:

- исходный гидрохимический состав воды в горной выработке, который определяется составом поступающих в нее подземных вод, а также минералогическими и геохимическими характеристиками пород, окружающих горную выработку;
- возможный рабочий объем заполнения, который должен обеспечить необходимое время выдержки в ней дренажных вод для достижения требуемой эффективности их очистки от соединений азота с учетом их содержания в поступающих на очистку дренажных водах и сезонных колебаний их объемов;
- результаты гидрогеологических исследований, обосновывающие предельный уровень заполнения карьера дренажными водами, который обеспечивает сохранение существующего гидрологического и гидрохимического режима прилегающей территории;

– наличие уже сформировавшейся экосистемы или возможность ее образования, поскольку очистка дренажных вод от соединений азота будет происходить в результате микробиологического процесса нитрификации аммонийного и нитритного азота с последующей ассимиляцией нитратного азота гидробионтами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хохряков А. В., Студенок А. Г., Ольховский А. М., Студенок Г. А. Количественная оценка вклада взрывных работ в загрязнение дренажных вод карьеров соединениями азота // Изв. вузов. Горный журнал. 2005. № 6. С. 29–31.
2. Хохряков А. В., Студенок А. Г., Студенок Г. А. Исследование процессов формирования химического загрязнения дренажных вод соединениями азота на примере карьера крупного горного предприятия // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 4(44). С. 35–37.
3. Катанов И. Б. Оценка влияния взрывных работ в условиях разрезов Кузбасса на качество карьерных вод // Вестник Кузбасского государственного технического университета. № 1. 2003. С. 15–17.
4. Студенок А. Г., Студенок Г. А., Ревво А. В. Оценка методов очистки сточных вод от соединений азота для дренажных вод горных предприятий // Известия Уральского государственного горного университета. 2013. № 2(30). С. 26–30.
5. Гусев М. В., Минеева Л. А. Микробиология. М: Академия, 2006. 446 с.
6. Зенин А. А., Белоусова Н. В. Гидрохимический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 241 с.
7. Попов А. Н., Бондаренко В. В., Дерябин В. Н. Биоинженерные методы и сооружения // Вода России. Водохозяйственное устройство. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2000. С. 316–328.
8. Русанов В. В., Гаранина И. А. О проблеме гидробиологической рекультивации карьерных водоемов // ГИАБ. 2004. № 6. С. 154–157.
9. Хохряков А. В., Цейтлин Е. М., Москвина О. А., Ларионова И. В. Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 56–63.

Поступила в редакцию 16 февраля 2018 года

### GEOECOLOGICAL FOUNDATION OF THE TECHNOLOGY OF NITROGEN COMPOUNDS REMOVAL FROM THE QUARRY WATERS IN THE EXHAUSTED EXCAVATION

Studenok G. A. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: genand@mail.ru

Drilling and blasting primary mining of rock mass with the use of explosives on the basis on ammonium nitrate leads to the quarry waters contamination with nitrogen compounds (nitrite, ammonium, and nitrate forms of nitrogen). Discharge of such waters in the water objects significantly damages them ecologically and results for large mining enterprises in multimillion payments for the infliction of harm to water resources. From the point of view of geocology the article substantiates the possibility and introduces the results of the realization of the technology of nitrogen compounds removal from the quarry waters of a large mining enterprise by means of microbiological nitrification by way of their supplying and keeping up in a partially flooded exhausted excavation with a fully developed ecosystem. Mining engineering conditions and geotechnological parameters of exhausted excavation are examined, which provide industrial and ecological security of the described technology.

**Key words:** geotechnology; geocology; removal; nitrogen compounds; exhausted excavation.

#### REFERENCES

1. Khokhriakov A. V., Studenok A. G., Ol'khovskii A. M., Studenok G. A. [Quantitative estimation of the contribution of blasting operations into the quarry waters pollution with the nitrogen compounds]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2005, no. 6, pp. 29–31. (In Russ.)
2. Khokhriakov A. V., Studenok A. G., Studenok G. A. [The investigation of the processes of generating the chemical contamination of quarry waters with nitrogen compounds by the example of an open pit of a large mining enterprise]. *Izvestiya Ural'skogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta – News of the Ural State Mining University*, 2016, no. 4(44), pp. 35–37. (In Russ.)
3. Katanov I. B. [Estimation of the influence of blasting operations in conditions of open pits of Kuzbass on the quality of pit water]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, no. 1, 2003, pp. 15–17. (In Russ.)
4. Studenok A. G., Studenok G. A., Revvo A. V. [Estimation of the methods of nitrogen compounds removal from the quarry waters of the mining enterprises]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta – News of the Ural State Mining University*, 2013, no. 2(30), pp. 26–30. (In Russ.)
5. Gusev M. V., Mineeva L. A. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. Moscow, Akademiia Publ., 2006. 446 p.
6. Zenin A. A., Belousova N. V. *Gidrokhimicheskii slovar'* [Hydrochemical dictionary]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1988. 241 p.

7. Popov A. N., Bondarenko V. V., Deriabin V. N. [Bioengineered methods and constructions]. *Voda Rossii. Vodokhoziaistvennoe ustroistvo* [Water of Russia. Hydro economic structure]. Ekaterinburg, Akva-Press, 2000, pp. 316–328.
  8. Rusanov V. V., Garanina I. A. [Regarding the problem of hydrobiological recultivation of quarry reservoirs]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2004, no. 6, pp. 154–157. (In Russ.)
  9. Khokhriakov A. V., Tseitlin E. M., Moskvina O. A., Larionova I. V. [Forecasting the concentration of contaminants in the components of the environment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 4, pp. 56–63. (In Russ.)
-