

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.11

УДК 624.012

С.Е. Аксенов, А.В. Никитин, А.В. Заручевных

Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ КОМБИНАТАХ

Представлены результаты обследований железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности Севера России. Вредными факторами для эксплуатации конструкций являются агрессивные жидкие вещества, масла и газы. Установлено, что после длительной эксплуатации железобетонные фундаменты производственных зданий и оборудования находятся в работоспособном состоянии.

Приведены сведения об изменении прочности бетона и коррозии арматуры в течение 30–70 лет эксплуатации для фундаментов и надземных конструкций. Прочность бетона фундамента, как правило, соответствует проектным значениям, или наблюдается незначительное снижение прочности до 3–9 %. Прочность бетона для наземных конструкций может снижаться на один-два класса. Наземные строительные конструкции эксплуатируются в условиях агрессивной среды, что приводит к их физическому износу. Дефектами надземных конструкций являются: снижение прочности бетона в результате сульфатной коррозии цементного камня, разрушение защитного слоя бетона и коррозия рабочей арматуры.

После 50–70 лет эксплуатации в агрессивной среде конструкции на целлюлозно-бумажных комбинатах находятся в работоспособном состоянии. В цехах, где в производстве применяют сульфаты и сульфиты, спустя 30–40 лет железобетонные конструкции приходят в неработоспособное состояние.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, целлюлозно-бумажный комбинат, прочность бетона, разрушение бетона, обследование конструкций.

S.E. Aksenov, A.V. Nikitin, A.V. Zaruchevnykh

North Arctic Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

EXPLOITATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES ON THE PULP-AND-PAPER MILLS

The results of the reinforced concrete structures' survey in various aggressive environments at the pulp-and-paper enterprises of the North of Russia are presented. Harmful factors for the operation of structures are aggressive liquids, oils and gases. It was found that after prolonged use of reinforced concrete foundations of industrial buildings and equipment are in working condition.

Information about the change of the strength of concrete and reinforcement corrosion for the foundations and overground structures within 30–70 years of operation is provided. The strength of the concrete foundation usually corresponds to the design values, or there is a slight reduction in strength of 3 to 9 %. Strength of concrete for aboveground structures can be reduced by one or two classes.

Underground constructions operated in an aggressive environment, which leads to their physical deterioration. Defects aboveground structures are: reduction of concrete strength as a result of sulfate corrosion of cement paste, destruction of the protective layer of concrete and corrosion of armature.

After 50–70 years of use in hostile environments, design for pulp and paper mills are in working condition. In building where used in the production of sulfates and sulfites, after 30–40 years the concrete structures come inoperable condition.

Keywords: reinforced concrete structures, pulp-and-paper mill, strength of concrete, concrete failure, survey designs.

Север России и, в частности, Архангельская область издавна славились большим лесным фондом. Дерево с давних времен использовалось как строительный материал. С развитием технического прогресса древесина стала использоваться в качестве сырья для производства картона, бумаги и целлюлозы.

На территории Архангельской области работают два целлюлозно-бумажных комбината (ЦБК), являющихся крупнейшими в России. Это Котласский ЦБК (КЦБК), расположенный в г. Коряжма на юге области, и Архангельский ЦБК (АЦБК) – в г. Новодвинске, расположенном в 25 км южнее Архангельска. Запуск комбинатов состоялся: Архангельского – в 1940 г., Котласского – в 1961 г.

На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности строительные конструкции, в том числе и железобетонные, эксплуатируются в агрессивной среде.

В процессе производства в атмосферу выбрасываются вредные газы с различной агрессивностью и концентрацией – сероводород, сернистый ангидрид, двуокись хлора, меркаптаны, выделяется известковая пыль и щелочные аэрозоли. По причине износа коммуникаций часть газов и пыли проникает в производственные цеха [1].

Кроме газов и пыли на конструкции попадают агрессивные жидкие кислые и щелочные вещества – белый, черные и зеленый шелока, соляная кислота, сырое сульфатное мыло, целлюлозная масса. Такие утечки происходят в результате аварий транспортирующих трубопроводов или в результате остановки оборудования для проведения планового ремонта, реконструкции и технического обслуживания. При эксплуатации машин и механизмов целлюлозно-бумажного производства, а также вспомогательных производств (обеспечивающих технологический процесс водой и электроэнергией) строительные конструкции в местах размещения двигателей и опор валов постоянно подвержены попаданию нефтепродуктов. Это минеральные масла (чаще – отработанные), используемые для смазывания трущихся деталей.

Степень агрессивности подземных вод на конструкции железобетонных фундаментов зависит от интенсивности протечек и вида технологических растворов при мытье полов, а также утечек жидкостей из систем охлаждения оборудования [2].

Специалистами кафедр инженерной геологии, оснований и фундаментов, а также инженерных конструкций Северного (Арктического) федерального университета за последние 30 лет были выполнены обследования стальных и железобетонных строительных конструкций в ряде цехов на всех производствах целлюлозно-бумажных комбинатов.

В результате проведенных обследований установлено, что даже после длительной эксплуатации в течение 50–70 лет железобетонные фундаменты каркаса зданий цехов и оборудования находятся в работоспособном состоянии (рис. 1).



Рис. 1. Фундаменты каркасов здания теплоэлектростанции (ТЭС) (а) и картонной фабрики (б) АЦБК в открытых шурфах

Определение прочности бетона производилось неразрушающим способом с применением метода ударного импульса прибором ИПС-МГ4.03 (рис. 2), а также путем испытания бетонных кернов, выбуренных из тела фундамента (рис. 3).

В 2008 г. было выполнено обследование фундаментов конвективной шахты котлоагрегата № 2 ТЭС-3 АЦБК в связи с реконструкцией производства и увеличением нагрузки на существующие свайные фундаменты. Здание ТЭС-3 было введено в эксплуатацию в 1976 г. Со-

гласно ГОСТ 10180–2012⁵ выполнялось определение прочности бетона ростверков с отбором образцов из конструкции. Диаметр отобранных кернов составлял 72,3 мм, высота 100 мм. По результатам лабораторных испытаний фактическая прочность бетона фундамента после 32 лет эксплуатации в агрессивной среде (сульфатные и сульфитные воды) составила 14,5 МПа. Проектный класс бетона В15. Прочность бетона снизилась на 3–7 %.



Рис. 2. Определение прочности бетона фундамента электрофильтра на КЦБК прибором ИПС-МГ4.03



Рис. 3. Выбуривание кернов бетона из фундамента картоноделательной машины № 1 АЦБК и отбор проб грунта из-под подошвы. Буровой станок СКБ-41

⁵ ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

В 2009 г. выполнено обследование фундаментов картоноделательной машины № 1 на АЦБК в свете предстоящей реконструкции. Машина была запущена в эксплуатацию в 1968 г. (рис. 4).

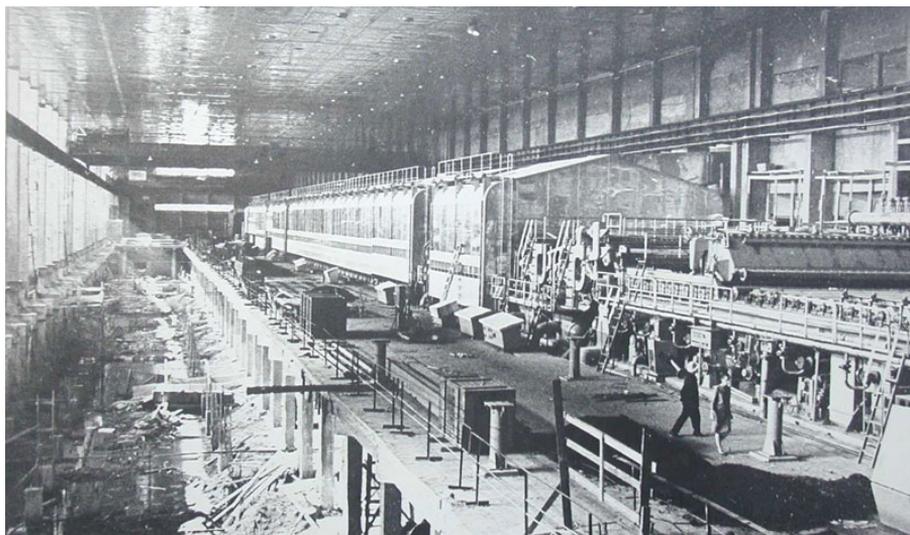


Рис. 4. Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат.
Картоноделательная машина № 1. 1968 г.⁶

Фундамент под машину представляет собой сложную пространственную систему, состоящую из ребристой фундаментной плиты с приямками, колонн, расположенных в два ряда вдоль оси картоноделательной машины с шагом 6 м. Колонны жестко соединены по верху системой балок, расположенных в продольном и поперечном направлениях, и монолитной плитой по верху балок. Отрывка шурфов не представлялась возможной, поэтому бетонные керны по ГОСТ 10180–2012⁷ отбирали с помощью бурения, используя станок СКБ-41 (см. рис. 3). В ходе бурения были отобраны керны бетона фундамента с глубины 2,5–3,3 м. Результаты испытаний показали, что прочностные характеристики на 5–9 % ниже проектных.

В 2012 г. выполнялись работы по обследованию фундаментов электрофильтра содорегенерационного котла № 2 на ТЭС-2 КЦБК. Запуск состоялся в 1964 г. Работы проводились перед заменой существ-

⁶ <http://www.appm.ru/foto>.

⁷ ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

вующего котла на новый. Проектная отметка заложения подошвы фундаментов $-2,700$, верха фундаментов $-0,150$. Размеры в плане подошвы фундаментов $3,8 \times 3,8$ м и $3,0 \times 3,0$ м. Результаты определения прочностных характеристик бетона показали превышение прочности бетона на 10–16 % по сравнению с проектной за 48 лет эксплуатации. При этом среда, в которой эксплуатировались конструкции, не является агрессивной к бетону.

По результатам обследований технического состояния фундаментов в различных цехах целлюлозно-бумажных комбинатов можно сделать следующие выводы. Прочностные характеристики бетона соответствовали проектным или наблюдалось незначительное снижение прочности. Это можно объяснить следующим:

- глубины заложения подошв фундаментов или низа ростверков находились на отметках $2,5-4,0$ м ниже уровня пола в цехах;
- на поверхности фундаментов была выполнена обмазочная битумная гидроизоляция;
- обратная засыпка фундаментов была выполнена слабо фильтрующими местными глинистыми грунтами (суглинками и глинами);
- относительно стабильная температура грунта основания в течение всего периода эксплуатации.

В гораздо худшем положении эксплуатируются надземные строительные конструкции. Рассмотрим несколько примеров.

Одна из причин разрушения железобетонных конструкций – коррозия цементного камня в результате растворения и вымывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а также при взаимодействии с ионами сульфата. В результате этого в бетоне происходят следующие химические преобразования:

- растворение и вынос из структуры бетона компонентов цементного камня;
- образование из цементного камня продуктов, не обладающих вяжущими свойствами, с последующим их накоплением в бетоне или выносом из структуры бетона;
- образование из цементного камня малорастворимых продуктов, увеличивающихся в объеме, с их последующим накоплением в бетоне, приводящем к его бетону.

В 2005 г. в связи с реконструкцией электрофильтра на ТЭС-2 АЦБК проводилось обследование промежуточного перекрытия на отметке $9,00$ м. Назначение электрофильтра – глубокая очистка дымовых

газов от золы. ТЭС-2 обслуживает производства картона, сырьем для которого является сульфатная небеленая целлюлоза и нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза. В эксплуатации электрофильтр находился с 1968 г. За 37 лет эксплуатации в результате протечек из технологических трубопроводов, смывов полов, утечек из электрофильтра бетон и арматура подверглись химической коррозии (рис. 5). Химическое разрушение бетона и арматуры ускорила высокая температура эксплуатации в помещениях под перекрытием (40–60 °С). В результате обследования были обнаружены следующие агрессивные вещества: пыль на бетонных конструкциях, которая содержала Na_2SO_4 и NaCl , в воздушной среде цеха – сернистый ангидрид и сероводород, $\text{pH} = 9$.



Рис. 5. Химическая коррозия бетона и арматуры

В результате обследования были выявлены следующие дефекты:

- снижение прочности бетона на один-два класса в результате сульфатной коррозии цементного камня;
- местное разрушение защитного слоя бетона плиты, коррозия вплоть до полного разрушения арматурных сеток;
- коррозия рабочей арматуры балок и ригелей с уменьшением поперечного сечения на 10–15 %.

В ходе реконструкции в 2006 г. одновременно с заменой электрофильтра были усилены балки перекрытия, демонтирована и вновь восстановлена плита перекрытия (рис. 6).

Другая причина снижения прочности бетона – взаимодействие с минеральными маслами. Такие масла, а особенно отработанные, изменяют прочность бетона и железобетона. При длительной эксплуатации в такой среде прочность бетона может снижаться до 1/3 от первоначаль-

ной [3–5]. Снижение физико-механических характеристик под влиянием масел можно объяснить следующим. Минеральные (нефтяные) масла являются смесью метановых, нафтеновых, ароматических и нафтеново-ароматических соединений. Углеводороды, составляющие минеральные масла, имеют общее свойство – неполярность. Кроме того, они не имеют достаточной маслянистости, смачивающей способности и липкости, необходимых для создания тонкого слоя смазки между трущимися частями машин. Для придания минеральным маслам антиокислительных, противоизносных, антикоррозионных и антипенных свойств в них оставляют при очистке 1,0–1,5 % кислородо-, серо- или азотосодержащих смол или вводят небольшое количество присадок. Снижение прочности бетона происходит за счет расклинивающего действия поверхностно-активных смол или присадок, содержащихся в маслах [6, 7].



Рис. 6. Усиление конструкций перекрытия

При пропитке маслом также отсутствует способность к гидратации клинкера цементного камня, в результате чего промасленные бетоны не могут набирать прочность со временем [3].

Согласно СНиП 2.03.11–85⁸ минеральные масла являются слабоагрессивной средой по отношению к бетонным конструкциям.

⁸ СНиП 2.03.11–85. Защита строительных конструкций от коррозии. М.: Стройиздат, 1985. 55 с.

В 2008 г. было выполнено обследование фундамента картоноделательной машины № 2 АЦБК перед реконструкцией. Фундамент имел рамную конструкцию, состоящую из монолитной плиты с глубиной заложения 3 м, колонн и подшинных балок, на которые опирается машина, имеющая несколько десятков прессовых валов. При эксплуатации машины происходит постоянное смазывание опорных участков валов. Отработанное машинное масло попадает на балки и колонны фундамента. В результате обследования были отобраны бетонные керны диаметром 58,7 мм (рис. 7).



Рис. 7. Бетонные керны, отобранные из конструкций фундамента картоноделательной машины

Места отбора проб показаны на рис. 8. Результаты испытаний представлены в таблице.

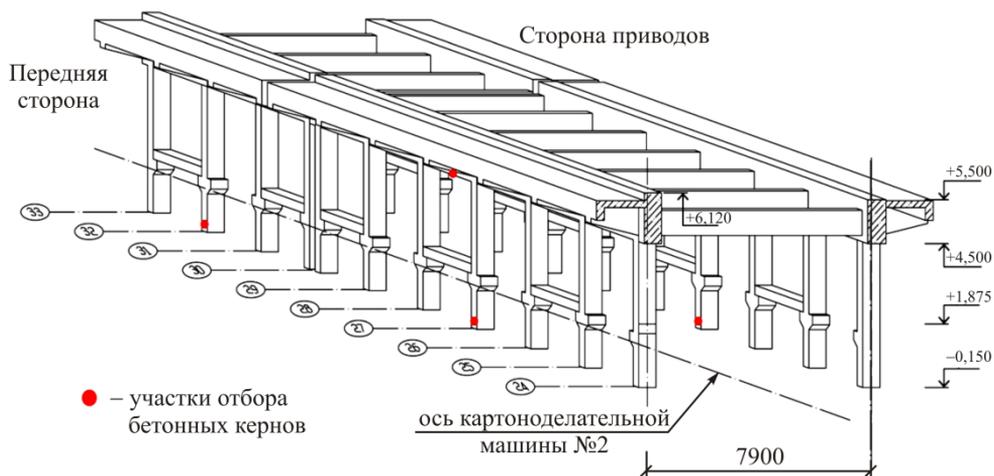


Рис. 8. Места отбора проб бетонных кернов из фундамента картоноделательной машины № 2 (показана надземная часть)

Образцы № 1, 3, 4, 9 отобраны из конструкций, не подверженных влиянию масла. Величина защитного слоя бетона колонн 40–45 мм, балок – 35–40 мм. В процессе 37-летней эксплуатации повреждена только часть защитного слоя бетона со снижением прочности до класса В10–В12,5. Прочность бетона в зоне, не подверженной влиянию масел, соответствует классу В15. Ввиду плотной структуры бетонного камня максимальная глубина проникновения минерального отработанного масла не превысила 2,4 см (при постоянном воздействии на конструкции (см. таблицу).

Результаты испытаний на сжатие образцов бетона

Номер образца	Место отбора керна (конструкция)	Высота образца, см	Глубина проникновения масла, см	Прочность образца, МПа	Класс бетона
1	колонна	5,2	0	20,9	В15
2	колонна	5,7	1,8	17,0	В12,5
3	колонна	6,2	2,4	14,2	В12,5
4	колонна	5,5	0	21,4	В15
5	колонна	5,8	2,2	11,8	В10
6	балка	5,6	0,6	16,5	В12,5
7	балка	6,1	0,7	14,8	В10
8	балка	5,8	1,5	12,6	В10
9	балка	5,6	0	21,4	В15

Выводы

Несмотря на агрессивную среду, в которой эксплуатируются бетонные и железобетонные конструкции на целлюлозно-бумажных комбинатах, в целом после 50–70 лет эксплуатации конструкции находятся в работоспособном состоянии с незначительным снижением прочностных характеристик. Это объясняется правильным подбором состава бетона с созданием плотной упаковки из входящих в состав бетона компонентов. Такая структура препятствует проникновению внутрь агрессивных химических компонентов и минеральных масел. Подземные конструкции, эксплуатирующиеся под защитой битумной гидроизоляции и обратной засыпки из плохо фильтрующих грунтов, находятся в работоспособном состоянии.

Исключение составляют цеха, где в производстве применяют сульфаты и сульфиты. В таких очень агрессивных условиях за 30–40 лет эксплуатации железобетонные конструкции, изготовленные даже с применением сульфатостойких цементов, приходят в негодность.

Библиографический список

1. Yeske R.A. Corrosion in pulp and paper industry // *IPC Technical Paper Series, number 192* / The Institute of Paper Chemistry, Appleton. – Wisconsin, 1986. – 13 p.
2. Опыт обследования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде / А.В. Вешняков, А.В. Заручевных, С.Е. Аксенов, А.В. Никитин // *Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции* / под ред. М.Ф. Марковского. – Минск: Стринко, 2007. – С. 130–140.
3. Васильев Н.М. Влияние нефтепродуктов на прочность бетона // *Бетон и железобетон*. – 1981. – № 3. – С. 36–37.
4. *Corrosion in reinforced concrete structures* / ed. by Hans Böhni. – Oxford, UK, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2005. – 246 p.
5. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
6. Юсупова Ю.Ф. Влияние минеральных масел на эксплуатационные качества железобетонных конструкций // *Изв. КазГАСУ. Строительные материалы и технологии*. – 2008. – № 1. – С. 137–140.
7. *Corrosion of reinforcement in concrete. Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques (European Federation of Corrosion Publications, number 38)* / ed. by M. Raupach, B. Elsener, R. Polred, J. Mietz. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2007. – 309 p.

References

1. Yeske R.A. Corrosion in pulp and paper industry. *IPC Technical Paper Series, number 192*. Wisconsin: The Institute Of Paper Chemistry, Appleton, 1986. 13 p.
2. Veshniakov A.V., Zaruchevnyh A.V., Aksenov S.E., Nikitin A.V. Opyt obsledovaniia zhelezobetonnykh konstruksii, ekspluatiruemykh v aggressivnoi srede [Experience of inspection of ferro-concrete construction, maintained in an excited environment]. *Sbornik trudov "Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. Chast' 1. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii*. Ed. M.F. Markov. Minsk: Strinko, 2007, pp. 130-140.
3. Vasil'ev N.M. Vliianie nefteproduktov na prochnost' betona [Impact of oil on the strength of concrete]. *Beton i zhelezobeton*, 1981, no. 3, pp. 36-37.

4. Corrosion in reinforced concrete structures. Ed. by Hans Böhni. Oxford, UK, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2005. 246 p.

5. Ferronskaia A.V. Dolgovechnost' konstruksii iz betona i zhelezobetona [Durability of structures made of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2006. 336 p.

6. Iusupova Iu.F. Vliianie mineral'nykh masel na ekspluatatsionnye kachestva zhelezobetonnykh konstruksii [Influence of mineral oils on the performance of concrete structures]. *Izvestiia Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'nye materialy i tekhnologii*, 2008, no. 1, pp. 137-140.

7. Corrosion of reinforcement in concrete. Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques (European Federation of Corrosion Publications, number 38). Ed. by M. Raupach, B. Elsener, R. Polred, J. Mietz. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2007. 309 p.

Получено 16.04.2015

Сведения об авторах

Аксенов Сергей Евгеньевич (Архангельск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины 17, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).

Никитин Андрей Викторович (Архангельск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины 17, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).

Заручевных Анатолий Витальевич (Архангельск, Россия) – директор Научно-исследовательского проектного центра Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины 17, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).

About the authors

Sergei E. Aksenov (Arkhangelsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Engineering Geology and Foundation Engineering, Northern (Arctic) Federal University

named after M.V. Lomonosov (22, st. Northern Dvina, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, 22, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).

Andrei V. Nikitin (Arkhangelsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Engineering Geology and Foundation Engineering, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (22, st. Northern Dvina, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).

Anatolii V. Zaruchevnykh (Arkhangelsk, Russian Federation) – Director of the Research Design Center, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (22, st. Northern Dvina, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: geolog-agtu@mail.ru).