



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ КОСТНО-УГЛЕРОДНЫХ ИМПЛАНТАТОВ И КОСТНЫХ АУТОТРАНСПЛАНТАТОВ ДЛЯ ПЕРЕДНЕГО СПОНДИЛОДЕЗА ПРИ ТУБЕРКУЛЕЗНОМ СПОНДИЛИТЕ

С.В. Бурлаков¹, В.В. Олейник¹, А.А. Вишнеvский¹, С.К. Гордеев²

¹Санкт-Петербургский НИИ фтизиопульмонологии

²ОАО «ЦНИИМатериалов», Санкт-Петербург

Цель исследования. Представление и оценка эффективности метода первичной стабилизации позвоночника с помощью комбинированного костно-углеродного имплантата (ККУИ) при хирургическом лечении пациентов с туберкулезным спондилитом.

Материал и методы. Проведено исследование механических характеристик углерод-углеродного имплантата «Гарго» и проанализировано клиническое применение оригинальной модели комбинированного имплантата. Клинический раздел исследования основан на анализе результатов хирургического лечения 20 пациентов с туберкулезным спондилитом, оперированных с применением ККУИ (группа 1). В качестве сравнения использовали результаты оперативного лечения 31 пациента с туберкулезным спондилитом, которым выполняли передний спондилодез костными аутографтами (группа 2). **Результаты.** Экспериментальное исследование показало, что углерод-углеродный имплантат выдерживает значительные статические нагрузки по сравнению с аутографтами. Разработанная модель ККУИ обладает значительным запасом прочности и биологической совместимостью. Костный анкилоз в группе 1 формировался чаще (90,0 % случаев), чем в группе 2 (67,7 %). Средний показатель эффективности лечения составил соответственно по группам 83,3 и 71,1 %, отличный и хороший результаты – в 88,2 и 77,8 %.

Заключение. Применение пластики ККУИ при туберкулезном спондилите показало ее высокую эффективность по сравнению с традиционно применяемым методом костной аутопластики.

Ключевые слова: костный аутографт, комбинированный костно-углеродный имплантат.

EXPERIMENTAL VALIDATION AND CLINICAL APPLICATION OF COMBINED BONE-CARBON IMPLANTS AND BONE AUTOGRAFTS FOR ANTERIOR SPINAL FUSION IN TUBERCULOUS SPONDYLITIS

S.V. Burlakov, V.V. Oleynik, A.A. Vishnevsky, S.K. Gordeyev

Objective. To present and assess the efficacy of the method of primary stabilization of the spine using combined bone-carbon implant in surgical treatment of patients with tuberculous spondylitis.

Material and Methods. Mechanical properties of the Gargo carbon-carbon implant were studied and clinical application of newly developed combined implant was analyzed. The clinical stage of the study included analysis of surgical treatment results in 20 patients with tuberculous spondylitis operated on using combined bone-carbon implant (Group 1). Results of surgical treatment of 31 patients with tuberculous spondylitis who underwent anterior fusion with bone autograft were used for comparison (Group 2).

Results. Experimental study showed that carbon-carbon implant bears greater static loads as compared with autografts. The engineered combined bone-carbon implant possesses a significant strength margin and biological compatibility. The incidence of bony ankylosis was greater in Group 1 (90.0 %) than in Group 2 (67.7 %). The treatment efficiency was 83.3 % in Group 1 and 71.1 % in Group 2, and excellent and good results were achieved in 88.2 % and 77.8 % of cases, respectively.

Conclusion. Results of application of combined bone-carbon implant for tuberculous spondylitis showed its high efficiency when compared with conventionally used osteoplasty.

Key Words: bone autograft, combined bone-carbon implant.

Hir. Pozvonoc. 2012;(4):59–64.

При выполнении переднего спондилодеза у пациентов с туберкулезным спондилитом часто используются костные аутооттрансплантаты [8, 9, 16]. Однако опыт их применения позволил выявить и некоторые отрицательные моменты. Так, для их взятия необходимо дополнительное хирургическое вмешательство, а возможности получения трансплантата в достаточном количестве ограничены. Кроме того, в послеоперационном периоде в 16–40 % случаев после костной пластики обнаруживаются резорбция, перелом трансплантатов, несращение их концов с ложем, нагноение в зоне пластики [2, 3, 5, 10, 17, 20].

Одновременно с разработкой методов костной пластики активно исследовали возможности использования небиологических пластических материалов (керамики, NiTi, гидроксипатита, пластмасс). Из пластических материалов, применяемых в вертебрологии, особого внимания заслуживают углеродные соединения [1, 4, 15, 18]. При контакте с костной тканью на их поверхности возникает тонкий слабоадсорбируемый белковый слой, развиваются соединительная и костная ткани, которые способствуют спондилодезу [1, 4]. Как показали клинические наблюдения, углерод-углеродные имплантаты (УУИ) позволяют надежно фиксировать оперированный отдел позвоночника, препятствуют нарастанию кифотической деформации, создают благоприятные условия для консолидации аутооттрансплантатов с костью позвонков [1].

Цель исследования – представление и оценка эффективности метода первичной стабилизации позвоночника с помощью комбинированного костно-углеродного имплантата (ККУИ) при хирургическом лечении пациентов с туберкулезным спондилитом.

Материал и методы

Провели исследование механических характеристик УУИ «Гарго» и проанализировали клиническое применение оригинальной модели комби-

нированного имплантата. Первую часть работы выполняли на базе ОАО «ЦНИИМатериалов» (Санкт-Петербург) в лаборатории механических испытаний. Технические испытания прочностных свойств имплантатов делали в соответствии с основными положениями стандартных методов определения механических свойств материалов [6]. Методом конечных элементов с помощью компьютерной программы «NX Nastran» (с определением критических нагрузок и устойчивости предложенных конструкций) промоделировали влияние формы и размеров паз в имплантате на концентрацию в нем напряжений (рис. 1).

Исследования проводили на двух типах конструкций имплантатов – с внедрением костного аутооттрансплантата в паз цилиндрического имплантата (внедренная модель) и с традиционным последовательным

расположением аутооттрансплантата и УУИ (разнесенная модель; рис. 2).

Клинический раздел исследования основан на анализе результатов хирургического лечения 20 больных туберкулезным спондилитом, оперированных в Амурском областном противотуберкулезном диспансере и Санкт-Петербургском НИИ фтизиопульмонологии с применением ККУИ (группа 1). В качестве сравнения использовали результаты оперативного лечения 31 пациента с туберкулезным спондилитом, которым выполняли передний спондилодез костными аутооттрансплантатами (группа 2). Средний возраст пациентов – 52 года (от 24 до 74 лет). Туберкулезное поражение локализовалось преимущественно в грудном и поясничном отделах позвоночника: в группе 1 – в 17 случаях, в группе 2 – в 28. В остальных случаях имела заинте-

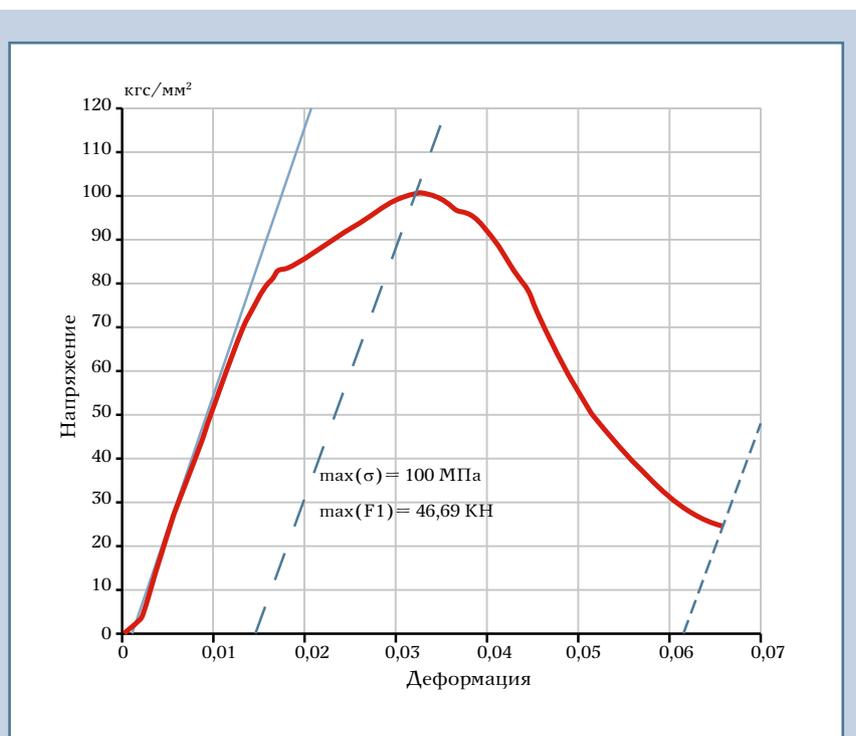


Рис. 1

Зависимость деформации в углеродном имплантате при его механической нагрузке и возникающем при этом напряжении материала (нисходящая часть кривой – разрушение углерод-углеродного имплантата происходит при напряжении 100 МПа)

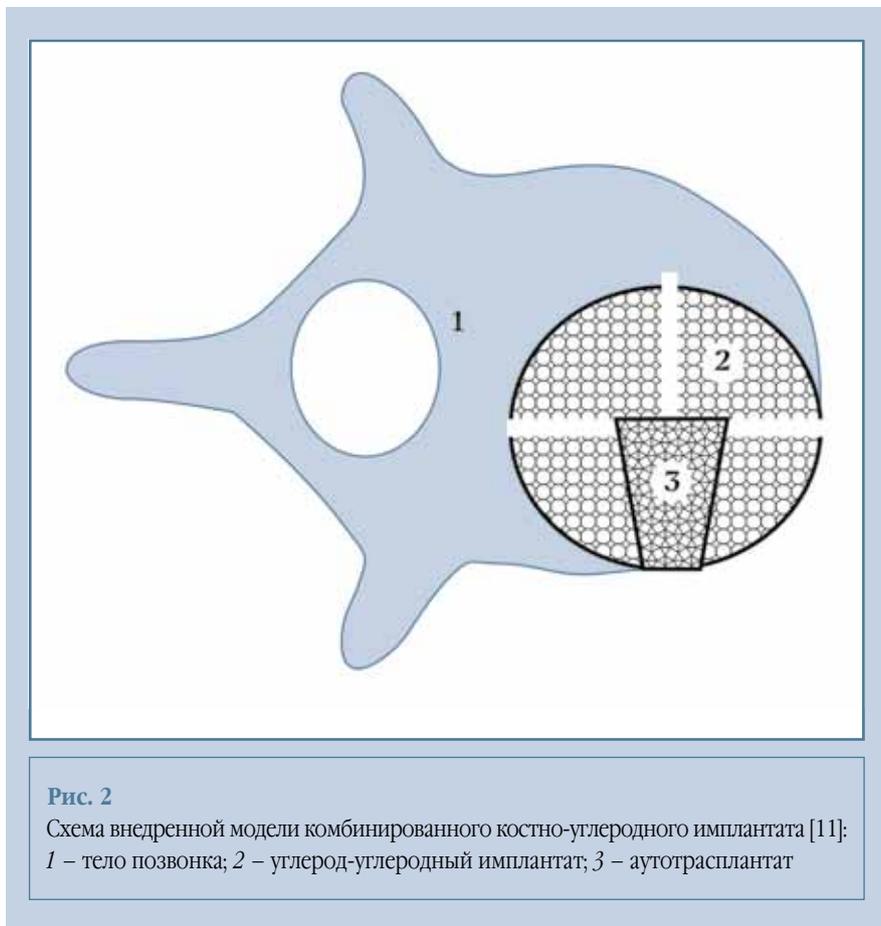


Рис. 2

Схема внедренной модели комбинированного костно-углеродного имплантата [11]: 1 – тело позвонка; 2 – углерод-углеродный имплантат; 3 – аутоотрансплантат

ресованность шейного отдела позвоночника. По локализации процесса и его распространенности различия между группами были незначительны ($P > 0,05$), что предопределило возможность провести корректную сравнительную оценку исследуемых групп.

При выполнении радикально-восстановительных операций применяли стандартные методики, разработанные в Санкт-Петербургском НИИ фтизиопульмонологии [4, 7, 10, 12, 13]. В шейном отделе применяли (с учетом анатомии блуждающего нерва) левосторонний доступ по Бурхарду, по краю – *m. sternocleidomastoideus* [9]. При операции на грудном отделе позвоночника использовали правосторонний трансторакальный доступ, при патологии груднопоясничного отдела – правосторонний трансторакально-диафрагмальный доступ или (в зависимости от количества пораженных грудных или поясничных позвонков) левосторонний забрюшинно-диафраг-

мальный с резекцией XII ребра [9, 12], при вмешательстве на поясничном отделе – левосторонний забрюшинный доступ, на пояснично-крестцовом – правосторонний забрюшинный доступ в развилку подвздошных сосудов.

Резекцию пораженных позвонков производили в соответствии с принятыми в Санкт-Петербургском НИИ фтизиопульмонологии стандартами [3, 12]. В процессе резекции выполняли ручную коррекцию деформации позвоночного канала путем удаления компримирующих факторов (остатков тел позвонков, секвестров, грануляций, казеозных масс, абсцессов), что позволяло освободить содержимое дурального мешка (спинной мозг, корешки).

Отдаленные результаты лечения прослежены через 1–5 лет после оперативного лечения.

Наряду с традиционными методами оценки отдаленных результатов лечения, исследовалось качество жизни: определяли степень дезадаптации больного до и после лечения. Показатели качества жизни рассчитывали по стандартным методикам [14, 19]. Динамика изменения степени дезадаптации пациента до и после лечения позволяла судить об эффективности лечения. Эффективность лечения 80–100 % оценивали как отличный результат (полное восстановление утраченных функций позвоночника), более 50 % – хороший, 10–50 % – удовлетворительный, менее 10 % – неудовлетворительный.

Статистическую обработку количественных показателей, полученных при исследовании, производили с помощью пакета прикладных компьютерных программ «Excel 2003», «Statistica 6.0».

Результаты и их обсуждение

Экспериментальное исследование показало, что УУИ выдерживают значительные статические нагрузки по сравнению с аутоотрансплантатами. Это позволило предположить, что размеры имплантата, а именно его поперечное сечение, можно уменьшить без значительной потери прочности. Это явилось обоснованием для формирования паза в цилиндрическом имплантате. При максимальной глубине паза (до 12 мм) напряжение в имплантате (14 МПа) было значительно ниже силы разрушительного воздействия (100 МПа), создаваемого прессом (рис. 3).

Продолжили усовершенствование способа переднего спондилодеза, предложенного М.В. Беляковым [1]. Ранее предполагалось использование конструкции УУИ «Гарго» и аутоотрансплантата с отдельным расположением элементов. Как показали наши исследования, костный аутоотрансплантат, как более мягкий материал, при осевой нагрузке более подвержен деформации. Это вызывает перекосящую конструкцию, состоящую из отдельных элементов, и снижает ее ста-

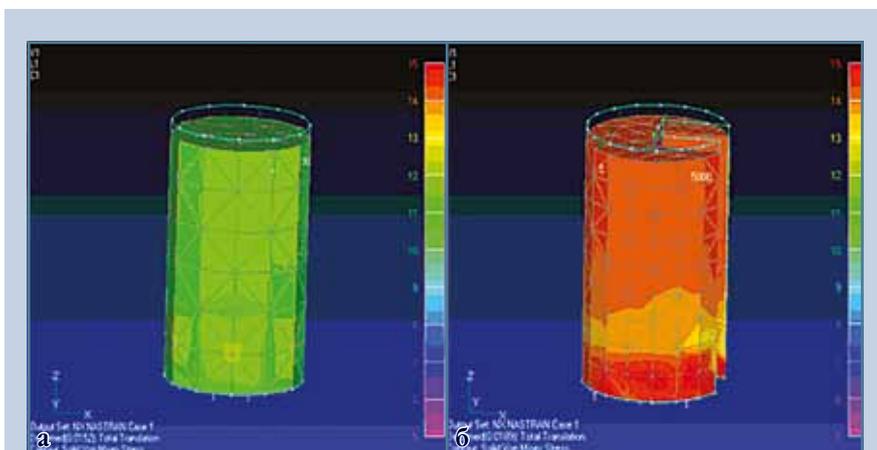


Рис. 3

Показатели напряжения в различных конструкциях углеродного имплантата (цилиндрической – 12 МПа и с пазом – 14 МПа); цифровым показателям в МПа на цветовой шкале соответствуют напряжения при механической нагрузке имплантатов: а – цилиндрический имплантат; б – имплантат с пазом

Таблица

Результаты переднего спондилодеза в отдаленном периоде, n (%)

Результат	Группа 1	Группа 2
Костный анкилоз позвонков	18 (90,0 ± 6,9)	21 (67,7 ± 8,5)
Прогрессирование процесса	2 (10,0 ± 6,5)	2 (6,5 ± 4,5)
Перелом трансплантата	–	1 (3,2 ± 3,2)
Фиброзный анкилоз с кифозом	–	7 (22,6 ± 7,5)
Осложнения	2 (10,0 ± 6,5)	10 (32,3 ± 8,5)

бильность. При статической нагрузке разнесенной модели напряжение в элементах конструкции достигает величины 30 МПа. Во внедренной модели напряжение в конструкции было в два раза меньше, чем в разнесенной модели (15 МПа). Это явилось основанием для применения у пациентов с туберкулезным спондилитом более стабильной внедренной модели ККУИ. Разработанная на этом основании модель внедренной формы имплантата состоит из цилиндрического УУИ, в котором имеется паз или ниша на всю его высоту и 1/2 диаметра в глубину для размещения костного трансплантата. Паз трапециевидной формы заполняется костным аутоотрансплантатом соответствующей формы, форма ниши препятствует его миграции.

В оценку результатов хирургического лечения включили изучение динамики неврологических нарушений. Неврологические нарушения в группе 1 были у 13 (66,6 %) пациентов, из них у 9 (69,2 %) – корешковый синдром, у 4 (30,8 %) – параличи и парезы. Параллегию (тип В) зафиксировали в 2 случаях, парапарез глубокой степени (тип С) – в 2. Хирургическое лечение (по показаниям с передней декомпрессией спинного мозга) позволило ликвидировать неврологические нарушения у 7 (53,8 %) пациентов, снизить их степень – у 4 (30,7 %), динамики не было – у 1 (7,6 %).

Неврологические нарушения в группе 2 были у 22 (70,9 %) пациентов, из них у 16 (72,7 %) – корешковый синдром, у 6 (27,3 %) – парезы и параличи. Паралегия (тип В)

– 1 случай, парез глубокой степени (тип С) – 4, парез легкой степени (тип D) – 1. Неврологические нарушения ликвидированы у 13 (59,1 %) пациентов, снижена их степень – у 7 (31,8 %), без динамики – у 2 (9,1 %).

Результаты переднего спондилодеза в отдаленном периоде, оцениваемые по методикам лучевой диагностики, представлены в табл. Костный анкилоз в группе 1 формировался чаще (90,0 % случаев), чем в группе 2 (67,7 %). Разница статистически достоверна $P < 0,001$.

В группе 1 рентгенологически наличие блока (кость ККУИ) выявлено у 18 из 20 пациентов. Блок резецированных позвонков получен не столько за счет прорастания кости в углеродный имплантат, сколько за счет образования костной спайки между резецированными позвонками и за счет костного сращения аутоотрансплантатами внедренного в углеродный имплантат с резецированными позвонками (рис. 4). В 2 (9,0 %) случаях возникли поздние осложнения в виде прогрессирования туберкулезного спондилита с симптомами нарушения опороспособности позвоночника и рентгенологически определяемой деструкции тел позвонков, смежных зоне спондилодеза. Больные были оперированы повторно с образованием костно-фиброзного блока через 6–12 мес. после респондилодеза.

В группе 2 наличие костного блока в отдаленном периоде наблюдали в 21 (67,7 %) случае. Послеоперационные осложнения были у 10 (32,3 %) пациентов: у 2 (6,5 %) – прогрессирование туберкулезного спондилита с симптомами нарушения опороспособности позвоночника и рентгенологически определяемой деструкции тел позвонков, смежных зоне спондилодеза, и лизисом аутоотрансплантата, у 1 (3,2 %) – перелом аутоотрансплантата, у 7 (22,6 %) – фиброзный анкилоз с кифотической деформацией. Респондилодез с применением имплантата из NiTi выполнили 3 пациентам.

Тестирование по Освестри показало снижение болевого синдро-

ма у пациентов группы 1 с $82,2 \pm 6,8$ до $21,0 \pm 3,6$ балла, группы 2 – с $59,5 \pm 4,5$ до $29,3 \pm 4,5$. При оценке отдаленных результатов отметили, что проведенное

лечение улучшило качество жизни, снизив степень дезадаптации с 38,7 до 6,8 % (в группе 1) и с 37,0 до 9,9 % (в группе 2),

несмотря на отсутствие достоверной разницы ($P \geq 0,05$).

Средний показатель эффективности лечения [19] составил соответственно по группам 83,3 и 71,1 %, отличный и хороший результаты – в 88,2 и 77,8 %.

Заключение

Разработанная модель ККУИ обладает значительным запасом прочности и биологической совместимостью с костной тканью позвонков и является оптимальным вариантом для спондилодеза при реконструктивно-восстановительных операциях на позвоночнике.

Непосредственные и отдаленные результаты применения пластики ККУИ при туберкулезном спондилите показали ее высокую эффективность, по сравнению с традиционно применяемым методом костной аутопластики как в плане формирования блока тел позвонков, так и в улучшении качества жизни.



Рис. 4

Туберкулезный спондилит L₂–L₄: состояние через 1 год после радикально-восстановительной операции на позвоночнике с применением комбинированного костно-углеродного имплантата (имеется костное сращение концов аутоимплантата с телами резецированных позвонков): 1 – углеродный имплантат; 2 – аутоимплантат

Литература

1. **Беляков М.В.** Применение углерод-углеродных имплантатов для переднего спондилодеза при воспалительных заболеваниях позвоночника: Автореф. дис. ... канд. мед. наук СПб., 2006.
2. **Ветрилэ С.Т., Кулешов А.А.** Хирургическое лечение переломов грудного и поясничного отделов позвоночника с использованием современных технологий // Хирургия позвоночника. 2004. № 3. С. 33–39.
3. **Гарбуз А.Е.** Реконструктивно-пластические операции при распространенных формах туберкулезного спондилита и их последствиях: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук Л., 1988.
4. **Гарбуз А.Е., Гусева В.Н., Якименко Д.В. и др.** Передний спондилодез углерод-углеродными имплантатами при заболеваниях позвоночника // Туберкулез в Северо-Западном регионе России: современные проблемы: сб. науч. тр. СПб., 2001. С. 98–102.
5. **Гончаров М.Ю., Сокович В.П., Данилов Е.П. и др.** Ближайшие результаты лечения гнойных неспецифических заболеваний позвоночника // Хирургия позвоночника. 2005. № 2. С. 70–72.
6. ГОСТ 23775–79. Изделия углеродные. Методы определения предела прочности на сжатие, изгиб, разрыв (диаметральное сжатие). Введ. 01.01.1981. М., 2001.
7. **Коваленко Д.Г.** Радикально-восстановительное направление в хирургии туберкулезного спондилита // Вестник хирургии. 1972. № 7. С. 57–61.
8. **Корж Н.А., Кладченко Л.А., Малышкина С.В. и др.** Имплантационные материалы и остеогенез. Роль биологической фиксации и остеоинтеграции в реконструкции кости // Ортопед, травматол. и протезир. 2005. № 4. С. 118–127.
9. **Никитин Г.Д., Корнилов М.В., Коваленко К.Н. и др.** Костная и металлическая фиксация позвоночника при заболеваниях, травмах и их последствиях. СПб., 1998.
10. **Олейник В.В.** Результаты хирургического лечения туберкулезного спондилита при генерализованном туберкулезе // Мониторинг, выявление, диагностика, лечение туберкулеза. Екатеринбург, 2004. С. 143–145.
11. Пат. № 2364362 Российская Федерация. Способ переднего комбинированного спондилодеза при воспалительных заболеваниях позвоночника / Бурлаков С.В., Мушкин А.Ю., Олейник В.В. и др.; заявл. 01.04.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
12. **Ракитянская А.Ф.** Методика мобилизации диафрагмы при экстраперитонеально-экстраплевральном доступе к груднопоясничному отделу позвоночника у больных распространенными формами туберкулезного спондилита // Проблемы туберкулеза. 1979. № 3. С. 39.
13. **Тиходеев С.А., Вишневский А.А.** Неспецифический остеомиелит позвоночника. СПб., 2004.
14. **Ульрих Э.В., Мушкин А.Ю.** Вертебрология в терминах, цифрах, рисунках. СПб., 2004.
15. **Юмашев Г.С., Лавров И.Н., Костиков В.И. и др.** Применение углеродных материалов в хирургии // Ортопед, травматол. и протезир. 1983. № 5. С. 62–64.
16. **Finkemeier CG.** Bone-grafting and bone-graft substitutes. J Bone Joint Surg Am. 2002;84:454–464.
17. **Govender S.** The outcome of allografts and anterior instrumentation in spinal tuberculosis. Clin Orthop Relat Res. 2002;(398):60–66.

18. **Kim KS, Yang TK, Lee JC.** Radiological changes in the bone fusion site after posterior lumbar interbody fusion using carbon cages impacted with laminar bone chips: follow-up study over more than 4 years. *Spine.* 2005;30:655–660.
19. **Lassale B, Deburge A, Benoist M.** Resultat a long terme du traitement chirurgical des stenoses lombaires. *Rev Rhum Mal Osteoartic.* 1985;(52):27–33.
20. **Stauffer RN, Coventry MB.** Anterior interbody lumbar spine fusion. Analysis of Mayo Clinic series. *J Bone Joint Surg Am.* 1972;54:756–768.
17. Govender S. The outcome of allografts and anterior instrumentation in spinal tuberculosis. *Clin Orthop Relat Res.* 2002;(398):60–66.
18. Kim KS, Yang TK, Lee JC. Radiological changes in the bone fusion site after posterior lumbar interbody fusion using carbon cages impacted with laminar bone chips: follow-up study over more than 4 years. *Spine.* 2005;30:655–660.
19. Lassale B, Deburge A, Benoist M. Resultat a long terme du traitement chirurgical des stenoses lombaires. *Rev Rhum Mal Osteoartic.* 1985;(52):27–33.
20. Stauffer RN, Coventry MB. Anterior interbody lumbar spine fusion. Analysis of Mayo Clinic series. *J Bone Joint Surg Am.* 1972;54:756–768.
1. Belyakov MV. [Use of carbon-carbonic implants in anterior fusion for inflammatory diseases of the spine]. Summary of the Candidate of Medicine Thesis. St. Petersburg, 2006. In Russian.
2. Vetrile ST, Kuleshov AA. [Surgical treatment for thoracic and lumbar spine fractures with modern technologies]. *Hir Pozvonoc.* 2004;(3):33–39. In Russian.
3. Garbuz AE. [Reconstructive surgery for common forms of tuberculous spondylitis and their consequences]. Summary of the Doctor of Medicine Thesis. Leningrad, 1988. In Russian.
4. Garbuz AE, Guseva VN, Yakimenko DV, et al. [Anterior spinal fusion with carbon-carbonic implants for spinal diseases]. In: Tuberculosis in Northwestern Region of Russia: Modern Problems. St. Petersburg, 2001:98–102. In Russian.
5. Goncharov MYu, Sokovich VP, Danilov EP, et al. [Immediate results of treatment for pyogenic nonspecific spine disease]. *Hir Pozvonoc.* 2005;(2):70–72. In Russian.
6. [Carbon products. Methods for the determination of compressive, bending, and tensile strength limits]. Came into force on 01.01.1981. Moscow, 2001. In Russian.
7. Kovalenko DG. [Radical reconstruction branch in surgery of tuberculous spondylitis]. *Vestnik Hirurgii.* 1972;(7):57–61. In Russian.
8. Korzh NA, Kladchenko LA, Malyshkina SV, et al. [Implant materials and osteogenesis. Role of optimization and stimulation in bone repair]. *Ortopediya, Travmatologiya i Protezirovanie.* 2005;(4):118–127. In Russian.
9. Nikitin GD, Kornilov MV, Kovalenko KN, et al. [Bone and metal fixation of the spine for diseases, injuries, and their consequences]. St. Petersburg, 1998. In Russian.
10. Oleynik VV. [Results of surgical treatment for tuberculous spondylitis in generalized tuberculosis]. In: Monitoring, Detection, Diagnosis, and Treatment of Tuberculosis. Ekaterinburg, 2004:143–145. In Russian.
11. Burlakov SV, Mushkin AYu, Oleynik VV, et al. [Method of anterior combined spinal fusion for inflammatory diseases of the spine]. RU Patent 2364362, filed 01.04.2008; publ. 20.08.2009. In Russian.
12. Rakityanskaya AF. [Technique of surgical release of the diaphragm through extraperitoneal/extrapleural approach to the thoracolumbar spine in patients with common forms of tuberculous spondylitis]. *Problemy tuberkuleza.* 1979;(3):39. In Russian.
13. Tikhodееv SA, Vishnevsky AA. [Nonspecific Spinal Osteomyelitis]. St. Petersburg, 2004. In Russian.
14. Ulrikh EV, Mushkin AYu. [Vertebrology in Terms, Figures, and Drawings]. St. Petersburg, 2004. In Russian.
15. Yumashev GS, Lavrov IN, Kostikov VI, et al. [Use of carbon materials in surgery]. *Ortopediya, Travmatologiya i Protezirovanie.* 1983;(5):62–64. In Russian.
16. Finkemeier CG. Bone-grafting and bone-graft substitutes. *J Bone Joint Surg Am.* 2002;84:454–464.

References

Адрес для переписки:

Бурлаков Сергей Владимирович
194356, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 18,
корп. 1, кв. 389,
burlakovsv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2012

С.В. Бурлаков, канд. мед. наук; В.В. Олейник, д-р мед. наук; А.А. Вишнеvский, д-р мед. наук, Санкт-Петербургский НИИ фтизиопульмонологии; С.К. Гордеев, д-р техн. наук, ОАО «ЦНИИ материалов», Санкт-Петербург.
S.V. Burlakov, MD, PhD; V.V. Oleynik, MD, DMSc; A.A. Vishnevsky, MD, DMSc, Federal State Institution «Saint-Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology»; S.K. Gordeyev, DTechSc, Central Research Institute for Materials, St. Petersburg.