

Компьютерная томография, трехмерная реконструкция и стереологический анализ дистракционного регенерата

В.И. Шевцов, М.М. Щудло, Н.А. Щудло, С.А. Ерофеев, Е.В. Осипова

Computerized tomography, three-dimensional reconstruction and stereological analysis of distractional regenerate

V.I. Shevtsov, M.M. Chtchoudlo, N.A. Chtchoudlo, S.A. Erofeev, E.V. Osipova

Российский научный центр "Восстановительная травматология и ортопедия" им. академика Г. А. Илизарова, г. Курган
(Генеральный директор — академик РАМТН, д.м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ В.И. Шевцов)

С целью изучения пространственных характеристик дистракционного регенерата на 14 сутки удлинения применено сочетание методов компьютерной томографии, трёхмерной реконструкции и стереологического анализа.

Существенно дополнена и уточнена визуальная информация об особенностях перелома кости при флексии остеоклазии и строения дистракционного регенерата. Интегральные стереологические параметры позволили оценить отдельные фазы остеогенеза и выявить нарушения динамического равновесия между ними.

Ключевые слова: дистракционный регенерат, компьютерная томография, трёхмерная реконструкция, стереология.

For the purpose of study of spatial characteristics of distractional regenerate we applied combination of methods of computerized tomography, three-dimensional reconstruction and stereological analysis.

Visual information about peculiarities of bone fracture while flexion osteoclasia and structure of distractional regenerate was essentially updated. Integral stereological parameters allowed to evaluate separate phases of osteogenesis and to identify disturbances of dynamic equilibrium between them.

Keywords: distractional regenerate, computerized tomography, three-dimensional reconstruction, stereology.

ВВЕДЕНИЕ

При удлинении конечности по Илизарову в диастазе между концами костных фрагментов формируется так называемый дистракционный регенерат. Традиционно он изучается по обзорным рентгенограммам, которые не всегда информативны, особенно на ранних сроках удлинения. Известна (1) попытка гистоморфометрического анализа пункционных биоптатов ди-

стракционного регенерата на этапах удлинения, свидетельствующая об актуальности его прижизненного исследования в ортопедо-травматологической практике. Однако вряд ли можно считать оправданной такую манипуляцию у больных; кроме того, биоптаты не являются репрезентативным эквивалентом развивающегося объекта.

ЦЕЛЬ

Прижизненное изучение пространственной структуры и объемных характеристик дистрак-

ционного регенерата на двухнедельном сроке удлинения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Адекватным методом такого исследования является стереологический анализ полной серии сечений регенерата [2]. Учитывая выраженную анизоморфность объекта в результате продольной (по вектору растяжения) ориентации его структур, репрезентативными являются только поперечные срезы. Для получения их мы ис-

пользовали компьютерную томографию [3], так как структуры регенерата, находящиеся на разных стадиях остеогенеза, различаются по степени минерализации и, соответственно, рентгеновской плотности.

Исследованы дистракционные регенераты 4 взрослых беспородных собак на 14-й день удли-

нения голени после флекссионной остеоклазии. Использованы четырех- и шестидесятикратный (по 2 опыта) режимы дистракции с суточной скоростью 1 мм. Серии поперечных компьютерных томограмм получены на аппарате Somatom AR-HP (Siemens) с шагом сканирования 1 мм.

Трёхмерную визуализацию компонентов дистракционного регенерата осуществляли, используя программу VT-3D фирмы IstaVideoTest (Санкт-Петербург), предусматривающую, наряду с автоматическим, ручное оконтуривание зон интереса, что позволило раздельно реконструировать из томографических срезов топологически разные структуры, находящиеся в одном диапазоне рентгеновской плотности.

На аппаратно-программном комплексе для анализа полутоновых изображений фирмы

«ДиаМорф» (Москва) по специально разработанному макросу в каждой томограмме определяли площадь регенерата (A_{reg}) и доли в ней (A_A) теней кортикальной пластинки (**cort**), высоко- (**os**) и среднеминерализованной (**min**) новообразованной костной ткани, слабоминерализованных (**oid**) и неминерализованных (**zon**) структур. Томографические срезы имели стандартную толщину 1,0 мм, что позволило без каких-либо трудностей перейти от двумерных характеристик компонентов изображения к расчетам их трехмерных, объемных параметров.

Объемные отношения (V_v) структур в отдельных томограммах и регенератах в целом считывали по принципу Delesse:

$$V_v = A_A \quad (I)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С каждым днем дистракции диастаз между концами костных фрагментов увеличивается в объеме на величину

$$Vd_d = (A_{transv} \times L_{day}) \text{ мм}^3 \quad (II),$$

где A_{transv} — площадь поперечного сечения диафиза кости на уровне нарушения её целостности в мм^2 , а L_{day} — величина суточного удлинения в мм.

Через n дней дистракции объем диастаза будет, соответственно, в n раз больше величины суточного прироста:

$$Vd_n = n \times Vd_d = n(A_{transv} \times L_{day}) \text{ мм}^3 \quad (III).$$

При наиболее часто используемой скорости дистракции по 1,0 мм в сутки формулы приобретают следующий вид:

$$Vd_d = A_{transv} \text{ мм}^3 \quad (II) \text{ и}$$

$$Vd_n = n \times A_{transv} \text{ мм}^3 \quad (III).$$

Учитывая, что по мере увеличения диастаза одновременно растет и заполняющий его дистракционный регенерат, эти же формулы могут служить для расчета его объемных характеристик.

Эксперимент 1208. Флекссионная остеоклазия; до дистракции — 5 суток; дистракция 2 недели по 1 мм в день за 60 приемов (автомат). Рентгенологически отчетливо определяется форма перелома — косая (рис. 1, Exp1208); при трехмерной визуализации обращенные друг к другу поверхности излома конгруэнтны условно, так как кортикальная пластинка фрагментов кости сохраняет признаки остаточной деформации после флекссионной остеоклазии. Высота сколов кортикальной пластинки по длинной оси большеберцовой кости — 14 мм, причем на протяжении 3 мм (рис.2, сканы №№ 45-47) вершины сколов перекрывают друг друга. На томограммах обнаружены признаки тангенциального расщепления кортикальной пластинки по краям сколов. В общем объеме зоны остеоклазии кор-

тикальная пластинка занимает 33%, и структуры формирующегося на этих же уровнях дистракционного регенерата с ней непосредственно связаны. В первую очередь это относится к костным отделам регенерата, представленным на этом этапе преимущественно очагами эндостального и, в меньшей степени, периостального остеогенеза. Наиболее развит эндостальный регенерат (Рис. 1, Exp.1208) в проксимальной и дистальной частях зоны остеоклазии (Рис. 2, сканы 37-40 и 54-56), а на уровнях перехода к целой кортикальной пластинке он заполняет весь объем костно-мозгового канала (сканы 35-36 и 57-58). Характерно, что на всем протяжении костных отделов дистракционного регенерата (сканы 35-48 и 53-58) четко контурирован(ы) канал(ы) питательных сосудов благодаря окружающей их костной муфте, степень минерализации которой выше, чем в прилежащих очагах эндостального остеогенеза. Она отсутствует лишь на уровне срединной прослойки дистракционного регенерата (сканы 49-51), где преобладают неминерализованные структуры (относительный объем — 39-48%).

Особенностью стереологического профиля дистракционного регенерата №1208 на двухнедельном сроке дистракции (Рис. 2, график) является отсутствие «остеоидных» зон на фоне выраженной симметрии: к прослойке протяженностью 3,5 мм непосредственно прилегают зоны минерализации по 2-2,5 мм каждая, продолжающиеся далее в проксимальном и дистальном направлениях в зоны сформированных эндостальных регенератов. В результате из новообразованных за 2 недели удлинения структур дистракционного регенерата (Рис. 2, диаграмма), заполняющих $3206,10 \text{ мм}^3$ объема диастаза, среднеминерализованная костная ткань составляет 61,2% ($1962,13 \text{ мм}^3$), тогда как на долю

слабоминерализованных и неминерализованных структур приходится 17,9% (573,89 мм³) и 20,9% (670,07 мм³) соответственно.

Таким образом, в эксперименте 1208 налицо признаки активного остеогенеза с небольшим сдвигом баланса в сторону фазы минерализации с накоплением, особенно на проксимальном уровне, больших объемов среднеминерализованной костной ткани, готовой к органотипической перестройке.

Эксперимент 1191. Флекссионная остеоклазия; до distraction – 5 суток; distraction 2 недели по 1 мм в день за 60 приемов (автомат). Рентгенологически определяется косо-поперечная форма перелома (Рис. 1, Exp. 1191). При

компьютерной томографии в кортикальной пластинке приторцевых зон обоих фрагментов большеберцовой кости выявлено несколько продольно-радиальных трещин (рис. 3, сканы 31, 44). Последовательный просмотр всей серии срезов убеждает в отсутствии свободных костных осколков. Совмещенная трехмерная реконструкция кортикальной пластинки и эндостального регенерата №1191 (Рис. 1) отличается выраженной симметрией, несмотря на сложную форму излома кости. «Прослойка» располагается на уровне середины диастаза и в центре пронизана «вершиной» дистального эндостального регенерата, который развит несколько сильнее, чем на проксимальном уровне. В костных

Рис. 1. Обзорные рентгенограммы костных регенератов в прямой (1) и боковой (2) проекциях и соответствующие им ракурсы – передний (1а), задний (1б), медиальный (2а), латеральный (2б) – совмещенных трехмерных реконструкций: материнской кортикальной пластинки (жёлтый цвет), рентгенконтрастной части эндостального регенерата (розовый цвет) и костной муфты канала питательных сосудов (красный цвет).

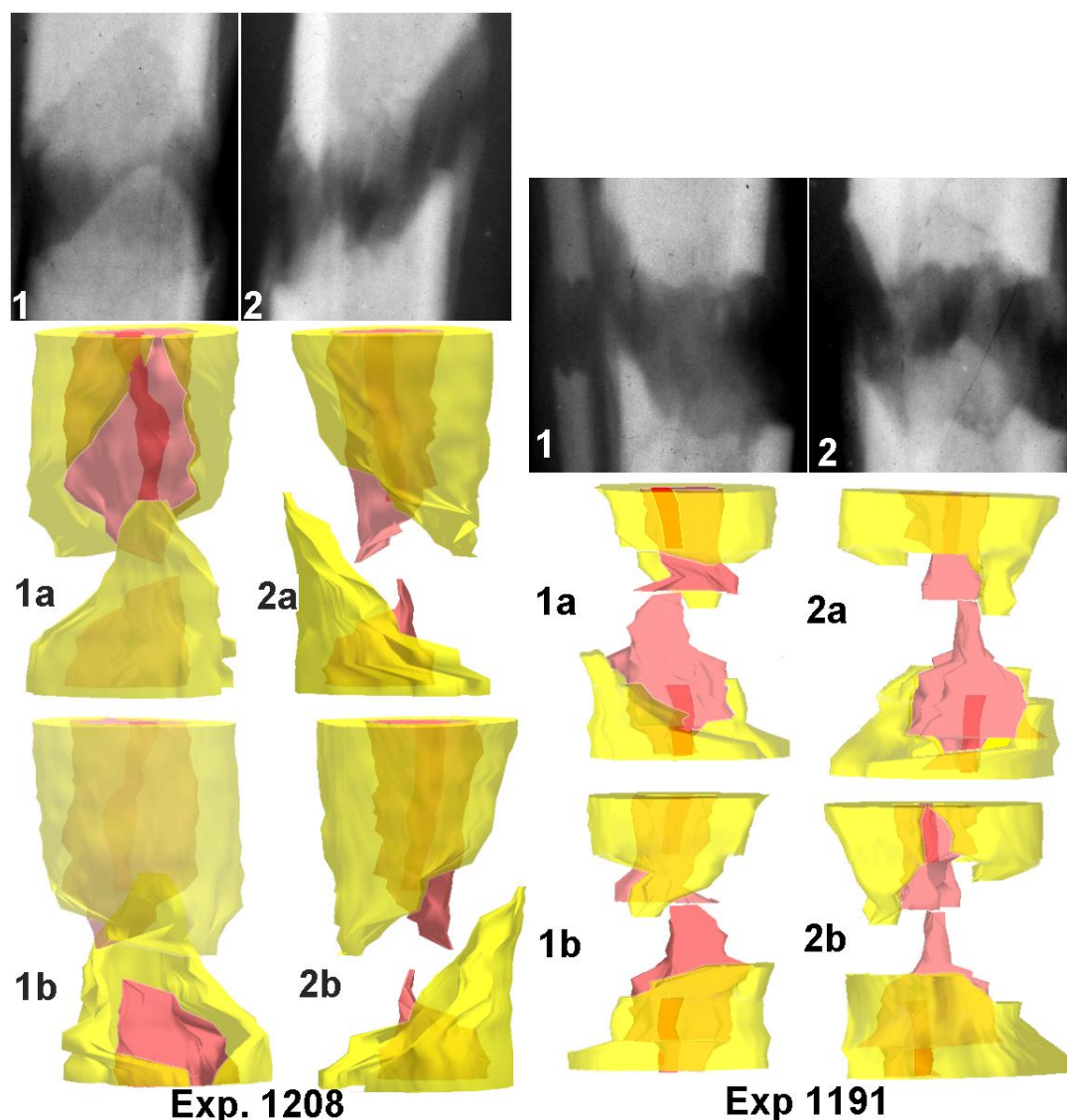
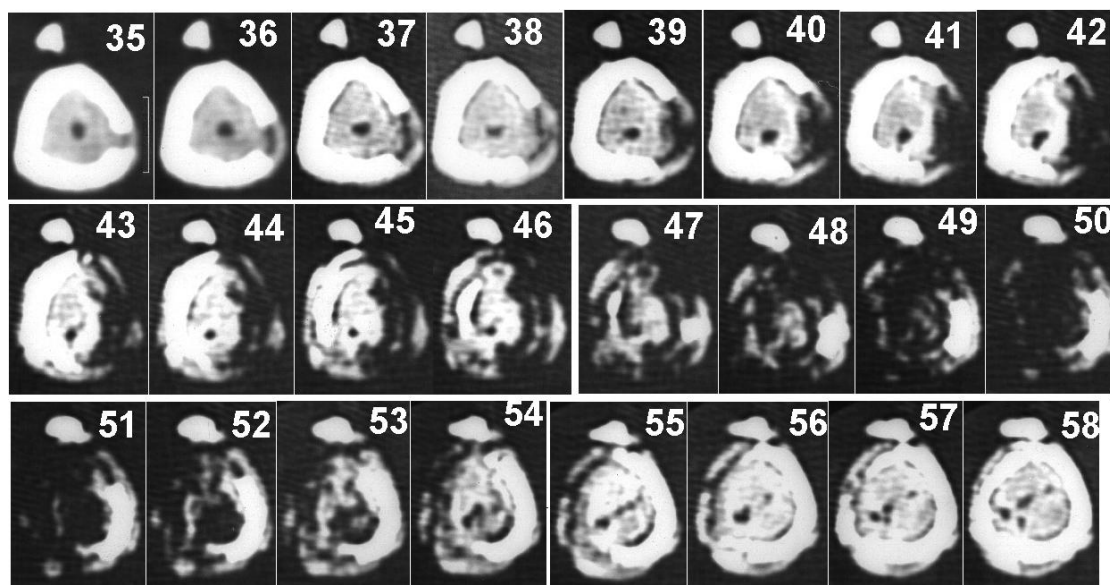
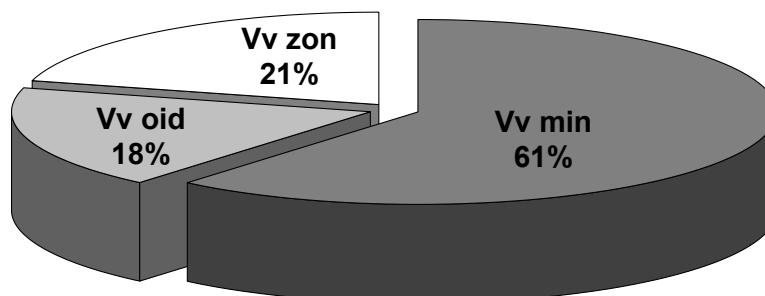
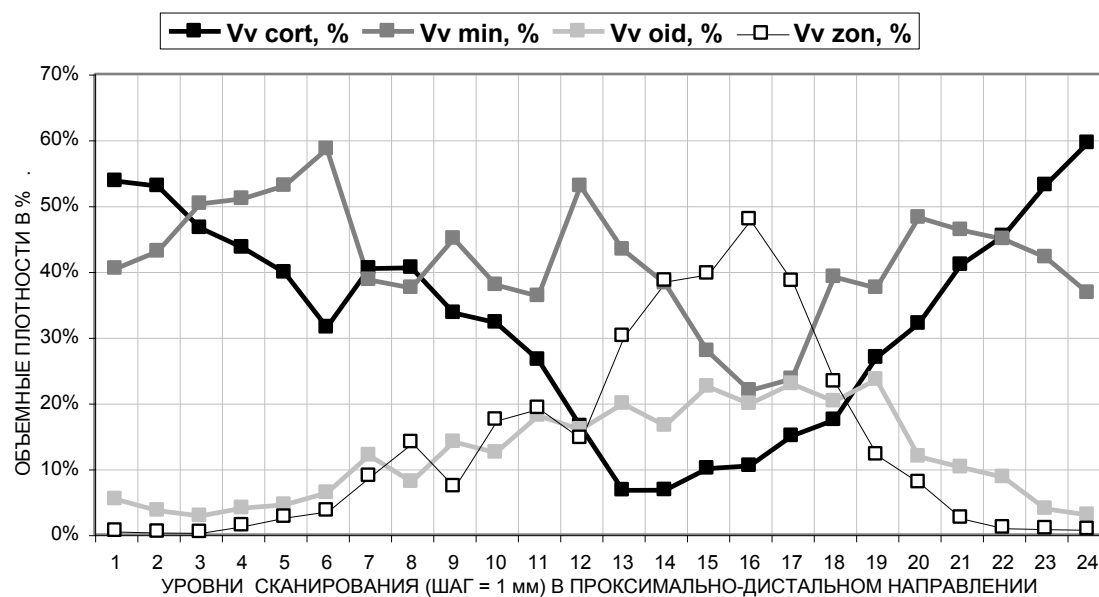


Рис. 2. Полная серия поперечных томограмм (монтаж), стереологический профиль (график) и объемный состав (диаграмма) distractionного регенерата собаки №1208; D-14.

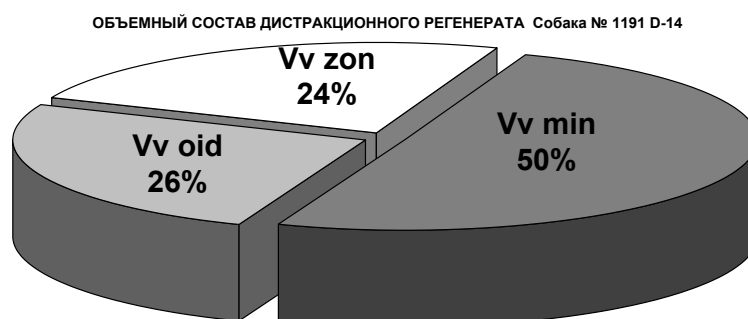
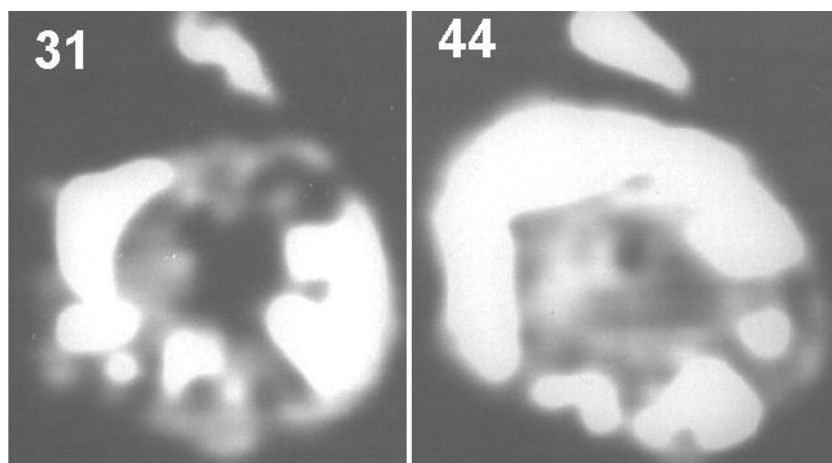


СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ ДИСТРАКЦИОННОГО РЕГЕНЕРАТА
Собака №1208 D-14 1/60



ОБЪЕМНЫЙ СОСТАВ ДИСТРАКЦИОННОГО РЕГЕНЕРАТА Собака № 1208; D-14.

Рис. 3. Характерные томограммы, стереологический профиль (график) и объемный состав (диаграмма) дистракционного регенерата собаки №1191; D-14.



отделах регенерата отчетливо выражен канал питательных сосудов, причем протяженность последнего одинакова на проксимальном и дистальном уровне. Стереологический профиль (Рис. 3, график) также указывает на четко сформированную зональную структуру регенерата: прослойка высотой 5-6 мм занимает срединное положение; здесь преобладают неминерализованные компоненты. Остальные зоны расположены симметрично проксимальнее и дистальнее прослойки: вплотную к ней прилежат зоны преобладания слабоминерализованных структур высотой 1 мм проксимальная и 2 мм - дистальная. Далее следуют зоны, в которых преобладающими по объему являются среднеминерализованные компоненты; обращенные к прослойке скаты пиков соответствующей кривой представляют зоны минерализации новообразующейся костной ткани. И здесь дистальная по высоте вдвое превышает проксимальную. Противоположные скаты этих же пиков составляют зоны органотипической перестройки новообразованной кости. В общем объеме дистракционного регенерата ($3304,42 \text{ мм}^3$), заполняющего диастаз, среднеминерализованные структуры составляют 50% (рис. 3, диаграмма). Вторую половину занимают слабо- и неминерализованные компоненты, причем доли этих двух последних (26 и 24% соответственно) приблизительно равны между собой. Эти объемные отношения отражают состояние динамического равновесия между фазами остеогенеза, хотя расширенная до 6 мм прослойка указывает на слегка проявляющуюся тенденцию к отставанию фазы коллагеногенеза, что в первой половине периода дистракции может быть обусловлено характером повреждения кости.

Эксперимент 1201. Флекссионная остеоклазия; до дистракции – 5 суток; дистракция 2 недели по 1 мм в день за 4 приема. По обзорным R-граммам (рис. 4, Exp. 1201) перелом поперечный, с зубчатыми торцами костных фрагментов. Диастаз перекрыт весьма плотной тенью регенерата; прослойка не определяется, что ставит вопрос о вероятности преждевременного «схватывания» регенерата. Трехмерная реконструкция по серии томограмм позволяет объяснить складывающееся при осмотре обзорных рентгенограмм впечатление о том, что конец проксимального фрагмента заужен по сравнению с дистальным: причиной является обширный воронкообразный косо-тангенциальный раскол кортикальной пластинки, в результате которого внутренние ее слои отошли к проксимальному, а наружные – к дистальному фрагменту кости. Обращает на себя внимание объемистый проксимальный костный отдел дистракционного регенерата, заполняющий не только костно-

мозговой канал проксимального фрагмента и большую часть диастаза, но и проникающий на несколько миллиметров костно-мозговой канал дистального фрагмента. Основу его составляет необычайно мощная костная муфта вокруг канала питательных сосудов (красный цвет на рис. 4, Exp 1201), срастающаяся с внутренней поверхностью корковой пластинки у торца проксимального фрагмента и особенно сильно развита на уровне диастаза (Рис. 5, скан 75); она на 3 мм проникает в костно-мозговой канал дистального фрагмента, не срастаясь с его кортикальной пластинкой. Далее на протяжении 4 мм она не видна, но в ее проекции на томограммах обнаруживается рентгенпрозрачный участок, занимающий срединную часть костно-мозгового канала (скан 84). На более дистальных уровнях контурируются уже несколько (2-4) периваскулярных каналов с окружающими их муфтами. Стереологический анализ (Рис. 5, график) демонстрирует очень высокую активность минерализации, в результате чего оказывается нарушенным динамическое равновесие между фазами остеогенеза: практически совмещены прослойка и «остеоидные» зоны, их общая высота сокращена до 2 мм, причем суммарная доля новообразованной высоко- и среднеминерализованной костной ткани на уровне прослойки приближается к 40%. Характерным отличием данного эксперимента от всех остальных наблюдений является наличие высокоминерализованной костной ткани ($V_{V_{os}}=3\%$) среди новообразованных компонентов ($V_{V_{min}}=52\%$; $V_{V_{oid}}=27\%$; $V_{V_{zon}}=18\%$) дистракционного регенерата (Рис. 5, диаграмма) в объеме диастаза ($2456,95 \text{ мм}^3$).

Анализируя в совокупности результаты трехмерной реконструкции, всю серию компьютерных томограмм и стереологический профиль дистракционного регенерата № 1201, можно заключить, что в этом эксперименте имело место значительное повреждение кости во время остеоклазии, обеспечившее сохранность сосудов не только в костно-мозговом канале, но и на уровне диастаза, и активный периваскулярный остеогенез, следствием которого было преждевременное (в районе 10-го дня дистракции) схватывание регенерата на уровне срединной прослойки в диастазе с последующим отрывом периваскулярной костной муфты питательных сосудов на уровне их ветвления в костно-мозговом канале приторцевой части дистального фрагмента и формированием здесь вторичной прослойки дистракционного регенерата (периваскулярная муфта, как сабля из ножен, вытягивается из костно-мозгового канала дистального фрагмента).

Эксперимент 1209. Флексионная остеоклазия; до distraction – 5 суток; distraction 2 недели по 1 мм в день за 4 приема. По обзорным R-граммам, выполненным в день операции (Рис.4, Эксп.1209, Op), перелом косо-поперечный, оскольчатый, хорошо отрепонированный;

на обоих фрагментах кости в зоне остеоклазии видны продольные трещины кортикальной пластинки. Через 14 дней distraction тень регенерата без видимых на то причин малоинтенсивная, костные отделы регенерата не выражены.

Рис.4. Обзорные рентгенограммы костных регенератов в прямой (1) и боковой (2) проекциях и соответствующие им ракурсы – передний (1а), задний (1б), медиальный (2а), латеральный (2б) – совмещённых трехмерных реконструкций: материнской кортикальной пластинки (жёлтый цвет), рентгенконтрастной части эндостального регенерата (розовый цвет) и костной муфты канала питательных сосудов (красный цвет). **Op** – R-граммы в день операции.

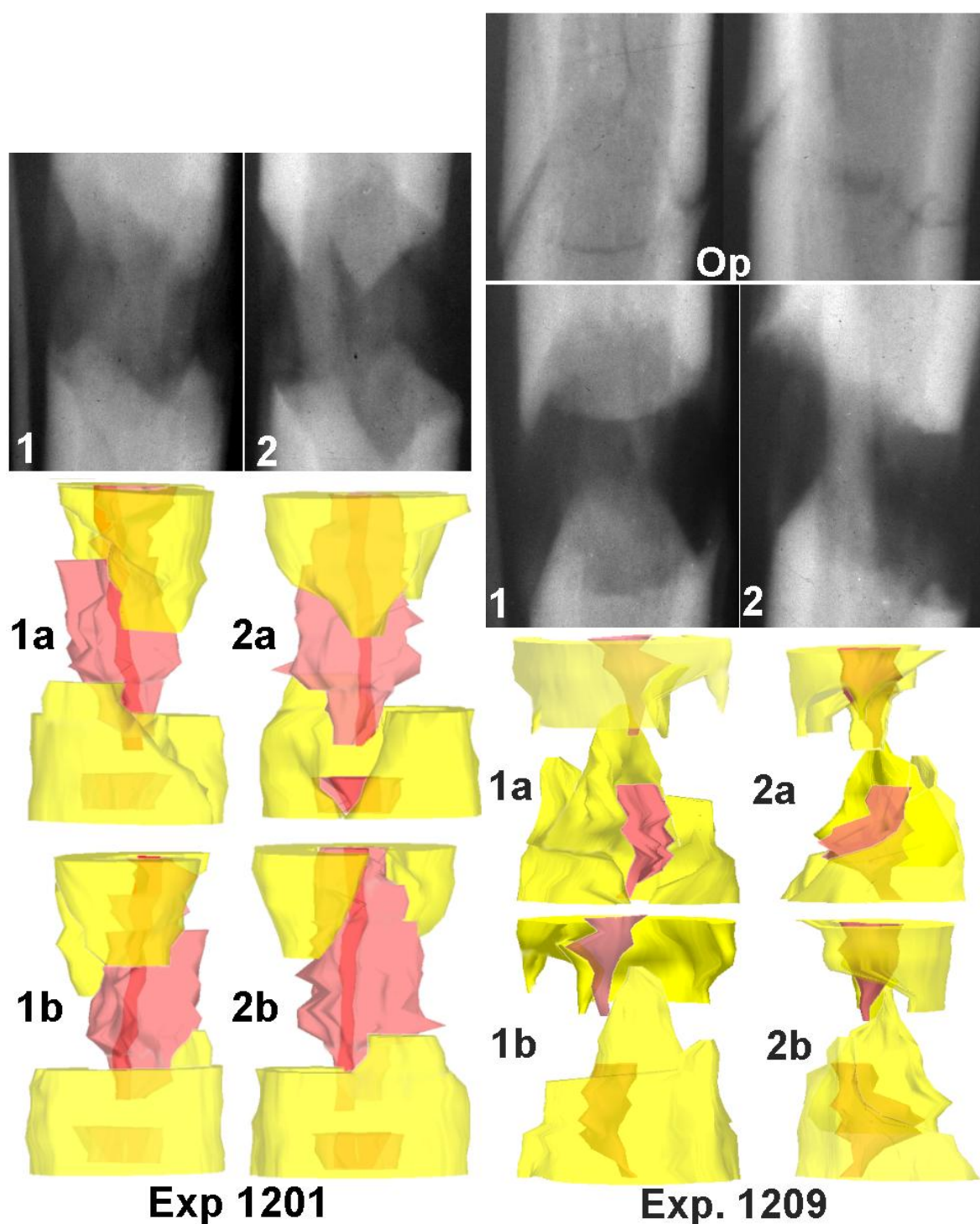
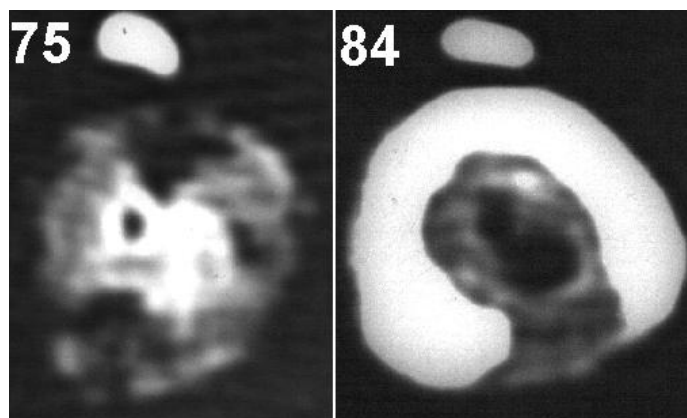
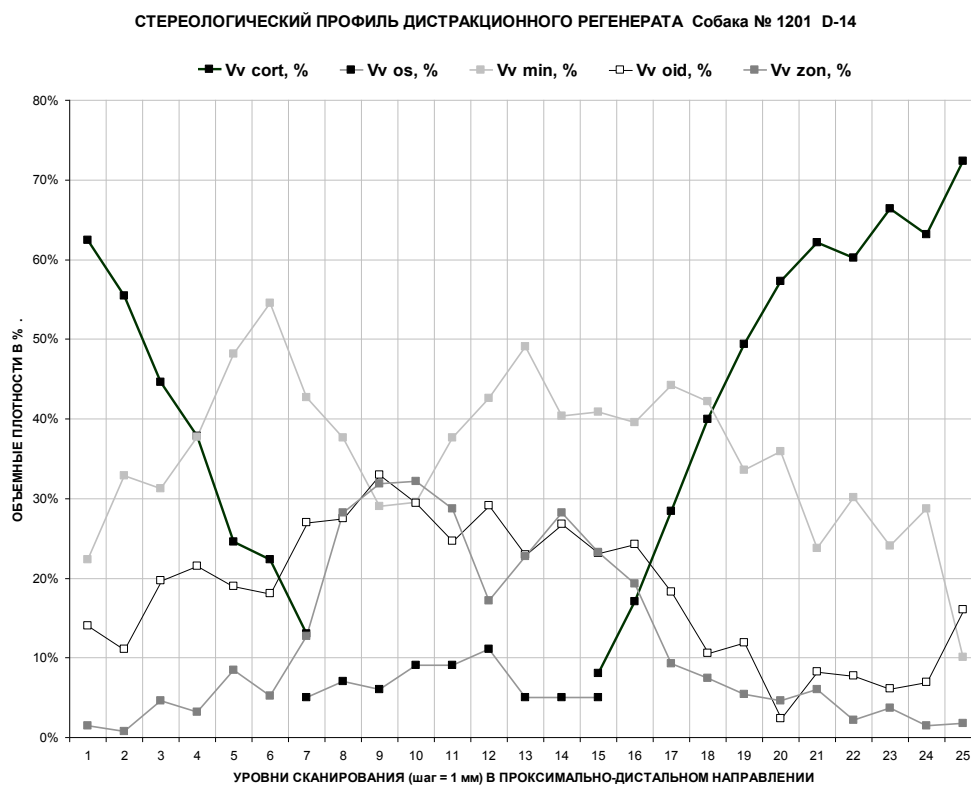


Рис. 5. Характерные томограммы, стереологический профиль (график) и объемный состав (диаграмма) дистракционного регенерата собаки № 1201; D-14.



Скан 75 – середина диастаза: эндостальный регенерат, формирующий костную муфту вокруг канала питательных сосудов (просветление в центре). Скан 84 – дистальный фрагмент: по периферии костно-мозгового канала видны очаги эндостального остеогенеза; просветление в центре – неминерализованный участок регенерата («прослойка»), где ранее располагалась костная периваскулярная муфта.



ОБЪЕМНЫЙ СОСТАВ ДИСТРАКЦИОННОГО РЕГЕНЕРАТА Собака № 1201 D-14

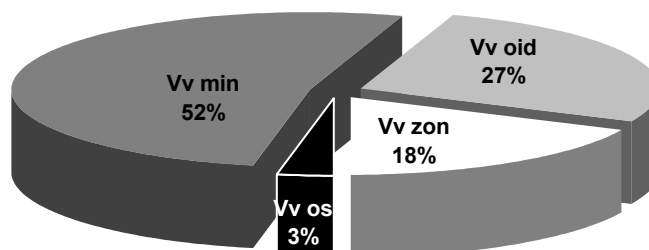
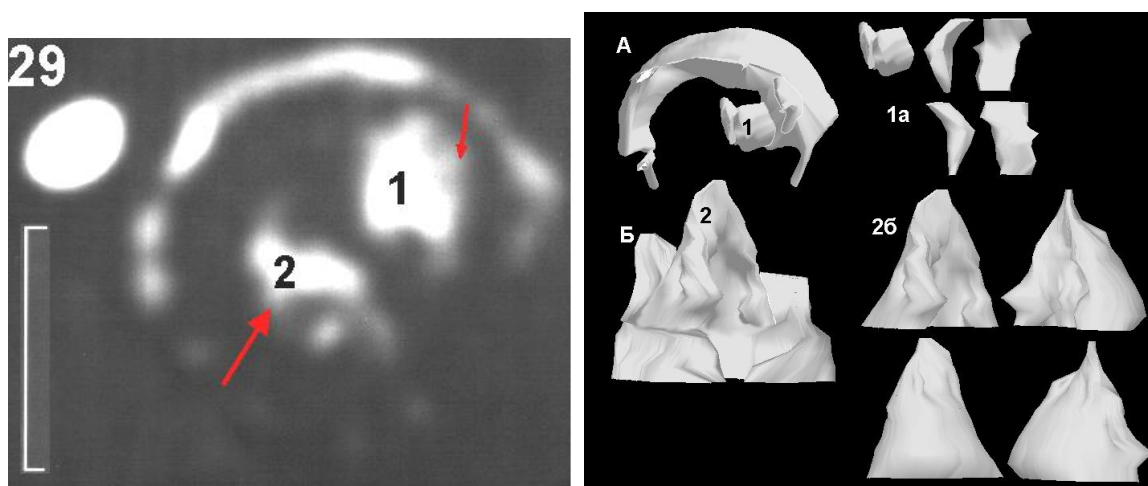
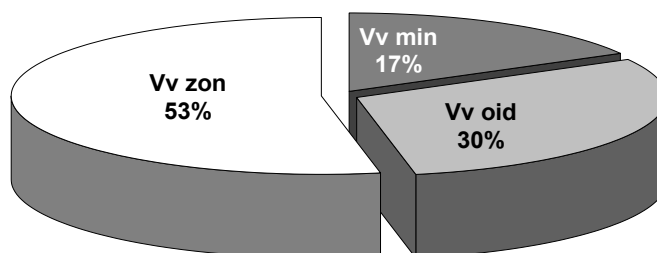
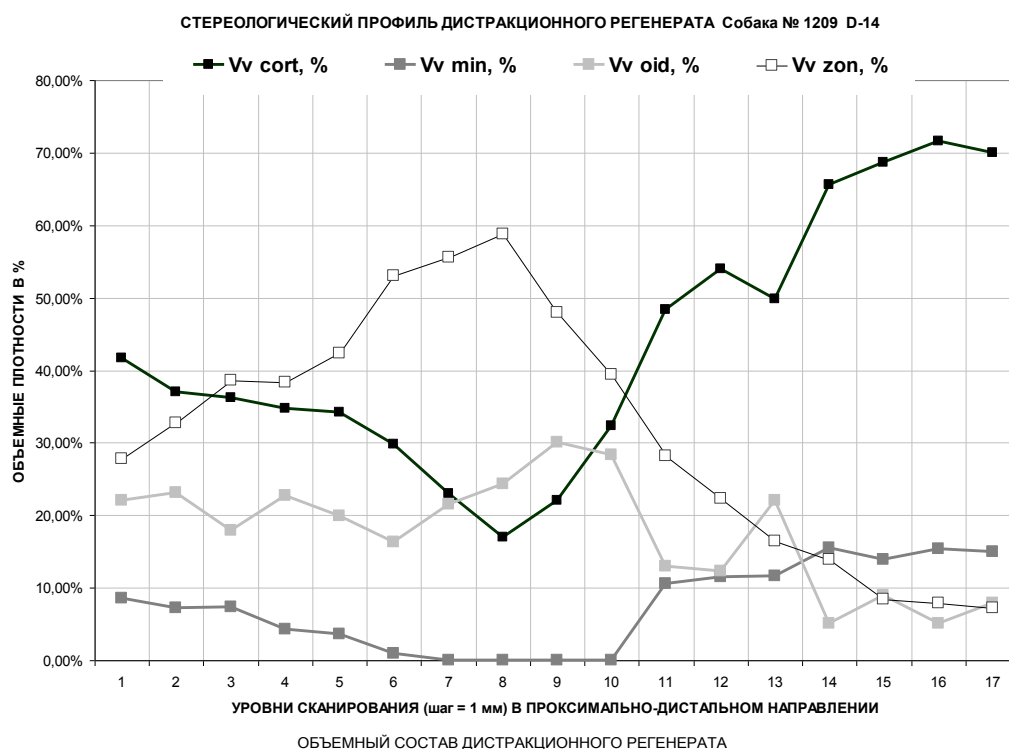


Рис. 6. Характерная томограмма, 3D-реконструкция кортикальной пластинки, стереологический профиль (график) и объемный состав (диаграмма) дистракционного регенерата собаки № 1209; D-14.



Слева – томограмма на уровне середины диастаза. Стрелки указывают направления смещения отщепов кортикальной пластинки в костно-мозговой канал. Справа – 3 D-реконструкция кортикальной пластинки: А – проксимальный фрагмент (вид снизу). Б – дистальный фрагмент (вид спереди). 1 – сместившийся в свободный осколок проксимального фрагмента, 1а – его вид снизу, спереди, изнутри, сзади и снаружи; 2 – отщеп дистального фрагмента, 26 – его вид спереди, с медиальной стороны, сзади и снаружи.



Компьютерная томография и пространственная реконструкция (Рис. 6) выявили тангенциальное расслоение кортикальной пластинки с отщеплением подвижных осколков от ее внутренней поверхности. На проксимальном фрагменте длина отщепа 6 мм, на дистальном – 12 мм. При последовательном просмотре томограмм выявлено, что проксимальный отщеп не связан с кортикальной пластинкой, смещен к центру костно-мозгового канала и несколько развернут (стрелка) вокруг собственной оси. В то же время дистальный отщеп своим основанием сохранил связь с внутренней поверхностью кортикальной пластинки, тогда как его вершина сместилась в радиальном направлении к центру костно-мозгового канала. При таком встречном смещении отщепов достаточно высока вероятность повреждения внутрикостных питательных сосудов. Возможно именно в силу этого в томограммах наблюдения №1209, в отличие от трех описанных выше экспериментов, не выявляется канал питательных сосудов. Сопоставление трехмерной реконструкции кортикальной пластинки с обзорными рентгенограммами (рис. 4, Эксп. 1209) позволяет объяснить заметный в

прямой рентгенологической проекции феномен – просветления в форме выпуклых менисков на уровне концов фрагментов. Ему соответствует менискообразное истончение кортикальной пластинки, особенно заметное при осмотре заднего ракурса реконструированного проксимального фрагмента. Такая форма истончения вероятно имеет две причины – тангенциальное расслоение кортикальной пластинки при остеоклазии и ее последующая резорбция. Стереологический профиль регенерата №1209 (Рис. 6, график) отличается протяженной прослойкой (высота 8-9 мм), ее асимметричным, со сдвигом в проксимальном направлении, расположением, отсутствием выраженных «остеоидных» зон и проксимальной зоны минерализации, что свидетельствует об очень низкой активности остеогенеза. В томограммах очаги остеогенеза малочисленны и малы по объему, в результате среднеминерализованные структуры занимают лишь 17% от общего объема ($3521,31 \text{ мм}^3$) диастаза, тогда как большую его часть составляют неминерализованные (53%) и слабоминерализованные (30%) компоненты (Рис. 6, диаграмма).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые примененное для изучения процесса дистракционного остеогенеза сочетание компьютерной томографии с методами компьютерной обработки изображений (объемная денситометрия, стереологический анализ и 3D-визуализация) позволяют получить новые знания и могут также служить эффективным диагностическим тестом. В частности, при трудно интерпретируемой рентгенологической картине может быть существенно дополнена и уточнена визуальная информация как о характере повреждения, так и индивидуальных особенностях строения регенерата.

Установлено, что флекссионная остеоклазия наряду со сквозными трещинами корковой пластинки во всех 4 изученных случаях вызвала также ее тангенциальное расслоение с образова-

нием разнообразных по форме, размерам и степени подвижности отщепов. Каждый из 4 исследованных случаев отличался от остальных неповторимой индивидуальностью перелома, особенности которого накладывали свой отпечаток на процессы репаративного и дистракционного остеогенеза в первые две недели дистракции.

Анализ полученных прижизненно интегральных количественных параметров, в частности, объемного состава и стереологического профиля дистракционного регенерата, позволяет оценить отдельные фазы остеогенеза, выявить нарушения динамического равновесия между ними, что позволяет своевременно осуществить медикаментозную коррекцию и при необходимости откорректировать режим дистракции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lascombes P., Membre H., Prevot J., Barrat E. Histomorphometrie du regenerat osseux dans les allongements des membres selon la technique d'Ilizarov. // Rev.Chir.Orthop. - 1991. - Vol. 77. - P.141-150.
2. Щудло М.М. Методические особенности стереологического анализа дистракционного регенерата // Гений ортопедии. - 1997. - №1. - С.86-87.
3. Шевцов В.И., Щудло М.М., Щудло Н.А. Способ стереологической оценки дистракционного остеогенеза, узел соединения опор аппарата и способ его применения. Заявка на изобретение. N гос. регистрации 96124163, приоритет от 30.12.96.

Рукопись поступила 17.11.98.