

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛЕЧЕБНОМ ПУЧКЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ УКЛАДКИ ПАЦИЕНТОВ

И.А. Головина<sup>1</sup>, Ж.С. Лебедева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет  
им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург

Собрана и проанализирована статистика порцедур укладки пациентов в отделении лучевой терапии для четырех локализаций: голова-шея, молочная железа, органы малого таза, органы грудной клетки. Рассмотрено влияние систематических и случайных погрешностей на укладку пациента. На основе полученных данных рассчитан отступ на точность укладки (set-up margin).

Ключевые слова: лучевая терапия, укладка пациента, визуализация в лечебном пучке, систематические погрешности, случайные погрешности, портальные снимки, СТВ-РТВ отступ

Необходимость точного воспроизведения укладки пациента в ходе курса фракционированной лучевой терапии играет ключевую роль в лечении. Осуществить данную задачу помогают такие методы визуализации, как планарная рентгеновская визуализация или визуализация в лечебном пучке (портальная визуализация), КТ с конусным пучком и другие.

В радиологическом отделении ПСПБГМУ для контроля укладки пациентов при лечении на ускорителе Varian Unique с максимальной номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ используется система портальной визуализации. В отличие от методов визуализации внутренней анатомии пациента в рентгеновском пучке киловольтного диапазона, визуализация в лечебном пучке имеет свои ограничения. Визуализация в киловольтном пучке позволяет корректировать позицию пациента ежедневно, в лечебном пучке такая тактика неприемлема из-за значительной дополнительной дозы на пациента.

В связи с этим в данный момент в отделении выбрана следующая схема визуализации укладки: производятся снимки первые 4 дня и

затем на каждый пятый день лечения. Снимки, полученные в первые три дня лечения, используются для обнаружения систематических и грубых ошибок укладки. Если необходимо, то на четвертый день референсные метки на теле пациента переносятся с учетом коррекции по результатам трех дней и выполняется контрольный снимок. Последующие снимки на каждый пятый день необходимы для проверки воспроизводимости укладки пациента в течение всего курса. Основой протокола, применяемого в отделении, является документ [1] с той лишь разницей, что внесенная корректировка трех дней контролируется на четвертый.

### Материал и методы

Для успешного лечения необходимо учитывать внутренние движения облучаемой мишени. В докладах ICRU 50 [2], 62 [3], 71 [4] и 83 [5] указаны рекомендации для выбора объемов облучения. В отчете ICRU 50 [2] описаны понятия СТВ и РТВ. При этом СТВ позволяет учитывать в себя все возможные смещения самой ми-

пени. В отчете ICRU 62 вводится дополнительное понятие ITV (Internal Target Volume) – объем, охватывающий CTV и учитывающий возможное изменение его положения, формы и размера (за счет дыхания, глотания, сердцебиения, изменения наполненности мочевого пузыря и прямой кишки, движения кишечника). Эта концепция позволяет разделить подход к определению CTV-PTV отступа и отступа на точность укладки (set-up margin) в зависимости от метода визуализации и доставки дозы. Так, при наличии КТ с конусным пучком и системы контроля дыхания есть возможность следить за положением мишени, поэтому нет необходимости в облучении всего объема ITV.

При наличии в отделении только системы портальной визуализации, снимок в лечебном пучке позволяет увидеть лишь структуры с высокой плотностью, в частности, костные ориентиры, что позволяет проследить только ошибки укладки пациента. Рентгенконтрастные метки, также визуализируемые данным методом, могут быть использованы для определения взаимного расположения интересующих мягкотканых компонентов относительно костных ориентиров в данной лечебной фракции, однако это не отменяет необходимость определения ITV ввиду невозможности проведения ежедневной визуализации. Вопросы, связанные с определением CTV-PTV отступа и методами оценки ITV при таком методе визуализации лежат за пределами данной работы.

Поскольку метод портальной визуализации позволяет отследить лишь ошибки укладки, данная работа посвящена только расчету отступа на точность укладки (SM).

При укладке пациента могут возникать случайные и систематические погрешности. Отступ SM вычисляется по следующей формуле [1]:

$$SM = a\Sigma_{\text{set-up}} + b\sigma_{\text{set-up}}, \quad (1)$$

где  $\Sigma_{\text{set-up}}$  – систематическая погрешность;  $\sigma_{\text{set-up}}$  – случайная погрешность;  $a$  и  $b$  – константы, которые характеризуют относительный вклад систематической и случайной погрешности.

Визуализация в лечебном пучке позволяет отследить следующие погрешности:

Случайные погрешности:

- ✓ Движение пациента.
- ✓ Различия каждодневных укладок.
- ✓ Отклонения, связанные с оборудованием.
- ✓ Непостоянство в интерпретации отметок на коже.

Систематические погрешности:

- ✓ Ошибка в результате передачи информации.
- ✓ Погрешности, связанные с различием между техническими данными симулятора, лечебного аппарата и т.д.
- ✓ Ошибки при записи лечебного плана.

Систематические ошибки опасны тем, что приводят к смещению всего дозового распределения относительно предполагаемого положения, иногда довольно значительному. Случайные же ошибки только размывают края дозового поля. Известно, что влияние систематической составляющей существенно выше, чем случайной [1].

Важно отличать грубые ошибки от случайных и систематических.

Грубая ошибка – это неприемлемо большая ошибка укладки, из-за которой часть CTV может получить недостаточную дозу, а органы риска – избыточную. Причиной грубой ошибки могут быть:

- ✓ Выбор неправильной анатомической структуры при совмещении изображений, неверная идентификация пациента или его общего положения на лечебном столе.
- ✓ Неправильный размер поля, его форма или ориентация.
- ✓ Неправильное положение изоцентра.
- ✓ Некорректно сохраненная разметка на теле пациента.

Отступ на точность укладки позволяет не учитывать грубые ошибки, поэтому они должны быть выявлены до того, как начнется курс лечения. Стандартный способ достижения этого – портальная визуализация укладки пациента непосредственно перед началом лечения. Получение и оценка цифровых изображений при первой фракции непосредственно перед началом облучения поможет избежать таких грубых ошибок, как неправильно поставленный стол, неверное истолкование инструкций по укладке и др.

Таблица 1

**Рекомендуемые формулы для выбора коэффициентов  $a$  и  $b$  [6]**

Van Herk	$SM = 2,5\Sigma_{\text{set-up}} + 0,7\sigma_{\text{set-up}}$
Stroom	$SM = 2\Sigma_{\text{set-up}} + 0,7\sigma_{\text{set-up}}$
Parker	$SM = \Sigma_{\text{set-up}} + \sqrt{(\sigma_{\text{set-up}})^2 + \Sigma_{\text{set-up}}^2}$

Таблица 2

**Пример расчета систематической и случайной погрешностей для пациента с мишенью, локализованной в области таза**

Направление	День 1, см	День 2, см	День 3, см	Неделя 2, см	Неделя 3, см	Неделя 4, см	Неделя 5, см	$m_{ind}$ , см	$\sigma_{ind}$ , см
Вертикально	0,6	-0,1	-0,1	0,1	0	-0,2	-0,1	0,03	0,25
Вдоль	-0,3	0,3	0,2	0	0,2	0,2	0,6	0,16	0,26
Вбок	0,4	0	0,3	-0,2	0	-0,3	-1,2	-0,05	0,56

В данной работе отдельно рассмотрены следующие локализации заболеваний – голова-шея, органы малого таза, молочная железа и органы грудной клетки, а также проанализировано, необходимо ли для каждой конкретной локализации изменить существующий отступ для обеспечения точности укладки.

На момент исследования в радиологическом отделении ПСПБМГУ придерживались следующих отступов на точность укладки: голова-шея 0,5 см, органы малого таза – 1 см, молочная железа – 1 см, органы грудной клетки – 1 см. Были использованы три из рекомендуемых в [6] формул для выбора коэффициентов  $a$  и  $b$  (табл. 1).

Согласно рекомендациям [1] для вычисления погрешностей  $\sigma$  и  $\Sigma$  были произведены следующие вычисления:

1. Расчет систематической погрешности для каждого пациента:

$$m_{ind} = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n) / n, \text{ [см]}, \quad (2)$$

где  $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n$  – смещения на каждой серии изображений;  $n$  – количество серий изображений.

Систематическая погрешность представляет собой выборочное среднее значение смещений пациента за курс лечения. Величина данной ошибки рассчитывалась отдельно по каждой из координат (вертикальной (vrt), продольной (lng) и боковой (lat)).

2. Расчет случайной погрешности для каждого пациента:

$$\sigma_{ind}^2 = ((\Delta_1 - m)^2 + (\Delta_2 - m)^2 + (\Delta_3 - m)^2 + \dots + (\Delta_n - m)^2) / (n - 1), \text{ [см]} \quad (3)$$

где  $m_{ind}$  – систематическая погрешность для данного пациента.

Случайная ошибка представляет собой среднее квадратичное отклонение случайной величины от среднего значения. Под случайной величиной надо понимать случайную ошибку укладки в конкретный день.

3. Расчет систематической погрешности для выборки пациентов:

$$\Sigma^2_{set-up} = ((m_{ind1} - M_{pop})^2 + (m_{ind2} - M_{pop})^2 + (m_{ind3} - M_{pop})^2 + \dots + (m_{indn} - M_{pop})^2) / (P - 1), \text{ [см]} \quad (4)$$

где  $m_{ind1}, m_{ind2}, m_{ind3}, \dots, m_{indn}$  – систематическая погрешность для каждого пациента;  $M_{pop}$  – среднее значение систематической погрешности для выборки пациентов;  $P$  – количество пациентов в выборке.

4. Расчет случайной погрешности для выборки пациентов:

$$\sigma_{set-up} = (\sigma_{ind1} + \sigma_{ind2} + \sigma_{ind3} + \dots + \sigma_{indp}) / P, \text{ [см]}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_p$  – случайная погрешность для каждого пациента,  $P$  – количество пациентов в выборке.

Необходимо отметить, что формула (5) верна лишь при определенных допущениях. В частности, предполагается, что количество изображений, полученных для каждого пациента за курс лечения, является величиной постоянной. Если же это различие небольшое, то, как утверждают авторы работы [1], возможные различия будут влиять на конечный результат незначительно.

В случае, если данные допущения не применимы, случайную погрешность для выборки пациентов необходимо оценивать следующим образом:

$$\sigma_{set-up} = ((\sigma_{ind1}^2 + \sigma_{ind2}^2 + \sigma_{ind3}^2 + \dots + \sigma_{indp}^2) / P)^{1/2}, \text{ [см]}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_p$  – случайная погрешность для каждого пациента,  $P$  – количество пациентов в выборке.

Пример расчета систематической и случайной погрешностей для пациента с мишенью, локализованной в области таза, приведен в табл. 2.

Аналогичные расчеты были проведены для всех пациентов по каждой координате.

**Таблица 3**  
**Рассчитанные значения систематической  $\Sigma_{\text{set-up}}$ , случайной  $\sigma_{\text{set-up}}$  погрешностей**  
**и величина отступа set-up margin для выборок пациентов по каждой локализации**

		$\Sigma_{\text{set-up}}$ , см	$\sigma_{\text{set-up}}^{(1)}$ , см	$\sigma_{\text{set-up}}^{(2)}$ , см	Отступ на точность укладки, см		
					$2,5\Sigma+0,7\sigma^{(1)}/$ $2,5\Sigma+0,7\sigma^{(2)}$	$2\Sigma+0,7\sigma^{(1)}/$ $2\Sigma+0,7\sigma^{(2)}$	$\Sigma+\sqrt{(\Sigma^2+\sigma^2)^{(1)}}$ $\Sigma+\sqrt{(\Sigma^2+\sigma^2)^{(2)}}$
Голова и шея	vert	0,13	0,15	0,18	0,42 / 0,44	0,35 / 0,38	0,32 / 0,35
	lng	0,17	0,20	0,28	0,56 / 0,61	0,47 / 0,53	0,43 / 0,49
	lat	0,16	0,19	0,28	0,52 / 0,59	0,45 / 0,51	0,40 / 0,48
Таз	vert	0,22	0,40	0,44	0,83 / 0,86	0,72 / 0,75	0,67 / 0,71
	lng	0,46	0,53	0,93	1,52 / 1,80	1,29 / 1,57	1,16 / 1,49
	lat	0,44	0,48	0,58	1,44 / 1,50	1,22 / 1,28	1,09 / 1,16
Таз (без учета полных пациентов)	vert	0,22	0,39	0,43	0,83 / 0,86	0,72 / 0,75	0,67 / 0,71
	lng	0,45	0,52	0,96	1,50 / 1,80	1,27 / 1,58	1,14 / 1,51
	lat	0,38	0,42	0,48	1,23 / 1,28	1,04 / 1,09	0,94 / 0,99
Молочная железа	vert	0,35	0,47	0,52	1,19 / 1,23	1,02 / 1,06	0,93 / 0,97
	lng	0,34	0,55	0,65	1,24 / 1,30	1,07 / 1,13	0,99 / 1,07
	lat	0,31	0,5	0,58	1,11 / 1,17	0,96 / 1,02	0,89 / 0,96
Органы грудной клетки	vert	0,27	0,41	0,59	0,97 / 1,10	0,83 / 0,96	0,77 / 0,93
	lng	0,25	0,33	0,39	0,86 / 0,91	0,74 / 0,78	0,67 / 0,72
	lat	0,22	0,28	0,32	0,74 / 0,77	0,63 / 0,66	0,57 / 0,60

## Результаты и обсуждение

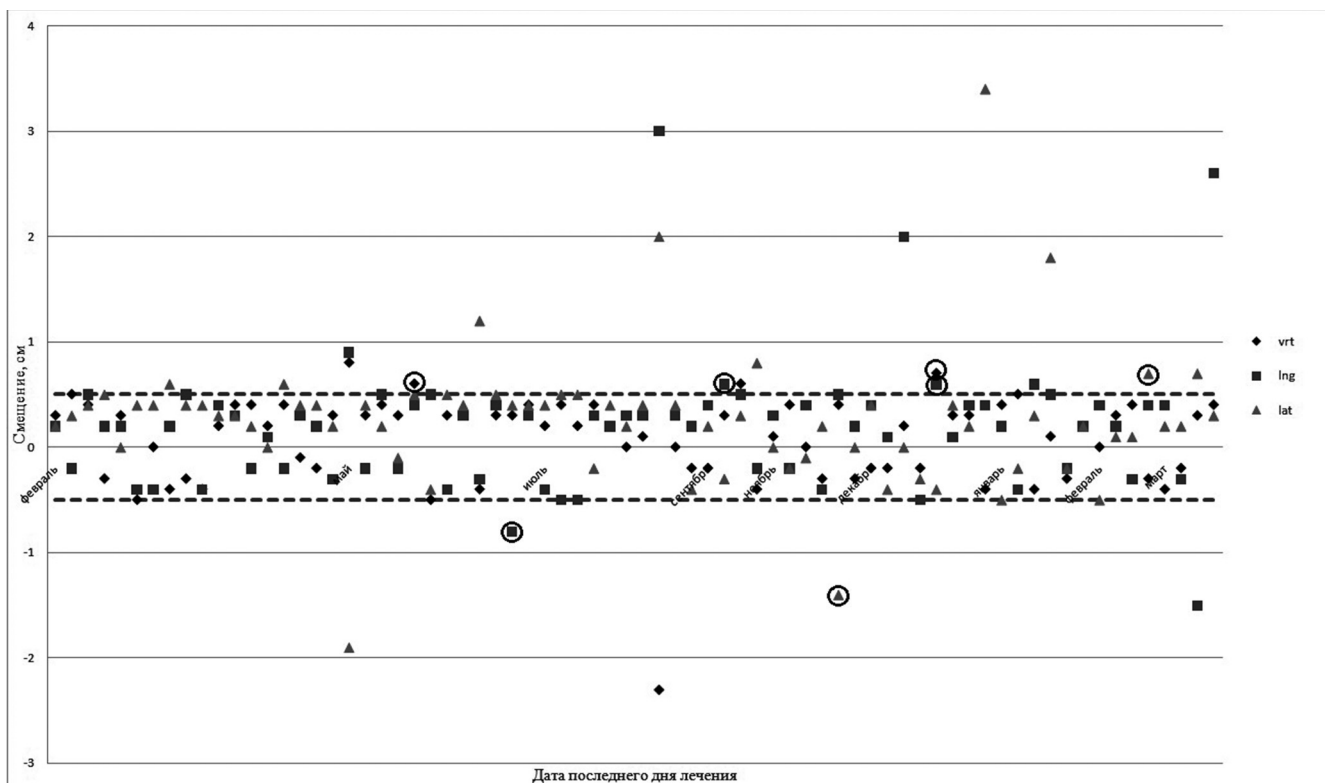
Всего были проанализированы данные для 72 пациентов с локализацией опухоли в области голова-шея, 40 пациентов с локализацией в области малого таза, 59 пациентов с локализацией опухоли в молочной железе и 17 пациентов с опухолью, расположенной в грудной клетке.

Затем были рассчитаны систематические и случайные погрешности для выборок пациентов по каждой локализации. Случайная погрешность была оценена двумя способами (по формулам (5) и (6)). Полученные значения  $\Sigma_{\text{set-up}}$ ,  $\sigma_{\text{set-up}}^{(1)}$  ( $\sigma_{\text{set-up}}^{(1)}$  – формула (5),  $\sigma_{\text{set-up}}^{(2)}$  – формула (6)) и входят в расчетную формулу. Рассчитанные значения данного отступа приведены в табл. 3.

В ходе исследования предполагалось, что допущения, необходимые для использования формулы (5), выполнялись, в связи с чем был произведен анализ данных именно для этого случая.

Анализ данных табл. 3 позволил сделать вывод о том, что отступ в 0,5 см для локализации голова-шея в изменении не нуждается. Отступ в 1 см в органах грудной клетки достаточен.

При анализе пациентов с мишенями, локализованными в области таза, было отмечено, что наибольшие ошибки в укладке возникают у полных пациентов. Расчет необходимого отступа без учета данных для полных пациентов также приведен в табл. 3 (из 40 – 5 полных). Видно, что рекомендуемый отступ по боковой координате уменьшился примерно на две десятых, что говорит о необходимости введения иного отступа для толстых пациентов. Ошибка по продольной координате не изменилась, что говорит о том, что независимо от размеров пациента положение таза часто бывает повернутым. Таким образом, можно отметить, что существующий на момент исследования отступ в 1 см для пациентов с мишенями, локализованными в области таза, необходимо увеличить до



**Рис. 1.** Максимальные смещения для выборки пациентов с локализацией «голова-шея» в зависимости от даты последнего дня лечения: ромбы – vrt, квадраты – lng, треугольники – lat

1,3 см. Отдельное внимание следует обращать на полноту пациентов, и для пациентов с передне-задним размером туловища больше 20–23 см вводить отдельный отступ на точность укладки.

При анализе отступа для пациентов с локализацией опухоли в молочной железе отмечено, что формула Ван Херка дает отступ в 1,2–1,3 см. Основываясь на данных, полученных при расчете отступа по другим формулам, можно сделать вывод о необходимости увеличения величины отступа для обеспечения точности укладки до 1,1–1,2 см.

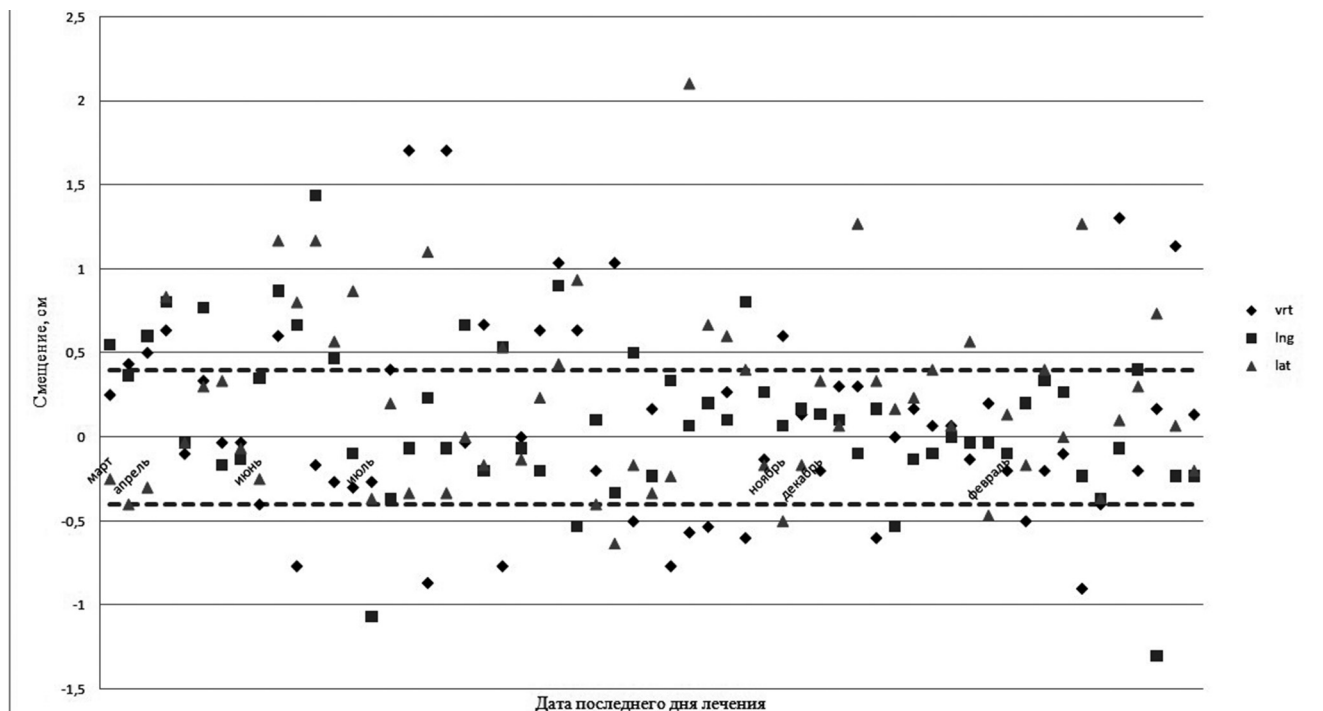
Верный расчет отступа на точность укладки дает гарантию, что в те дни, когда визуализация укладки не производится, пациент будет лежать таким образом, что вся опухоль получит запланированную дозу. Однако рассчитать отступ недостаточно. Необходимо понимать причины ошибок укладки, чтобы в дальнейшем их избегать. Для этого были построены следующие графики:

1. На рис. 1 приведена зависимость максимального смещения пациента от даты последнего дня лечения для локализации голова-

шея. Из графика видно, насколько хорошо была произведена укладка пациента.

Первый пациент закончил лечение в феврале 2016 г., последний – в марте 2017 г. На графике отображены ошибки укладки по каждой координате: вертикальной, продольной и боковой. Пунктирными линиями обозначен отступ, которого на момент исследования придерживались в отделении – 0,5 см. Значки, выходящие за пределы этой полосы, свидетельствуют о том, что пациент был уложен некорректно. Это означает, что если бы коррекция укладки перед лечением не была произведена, то в этот день какая-то часть опухоли получила бы недостаточную дозу.

Грубые ошибки укладки, полученные в первые три дня лечения, заслуживают отдельного внимания. На рис. 1 они обозначены значками без кружка, выходящими за пределы полосы. Как видно, большинство грубых ошибок укладки в первые три дня были выявлены до начала лечения с помощью снимков в лечебном пучке, после чего была произведена коррекция укладки. Тогда можно с уверенностью утверждать, что в последующие дни,



**Рис. 2.** Среднее смещение за три дня для выборки пациентов с локализацией “молочная железа” в зависимости от даты последнего дня лечения: ромбы – vrt, квадраты – lng, треугольники – lat

когда визуализация укладки не производилась, грубых ошибок в положении пациента на лечебном столе не было.

Ошибки укладки, выпадающие за полосу допустимых значений и полученные не в первые три дня лечения, отмечены кружками. Важно понимать причину их возникновения. В каждом конкретном случае был проведен анализ причин данной ошибки.

2. На рис. 2 приведена зависимость среднего смещения пациента за три дня от даты последнего дня лечения для локализации молочной железы.

Среднее смещение за три дня представляют собой систематическую погрешность. Если полученное значение превышает значительную ошибку укладки, на четвертый день производится перенос лечебных меток.

Величина значительной ошибки укладки для локализации молочной железы при отступе на точность укладки в 1 см оценена в 0,4 см. Как видно из рис. 2, среднее по трем дням часто превышало данную величину, тогда выполнялась процедура переноса лечебных меток.

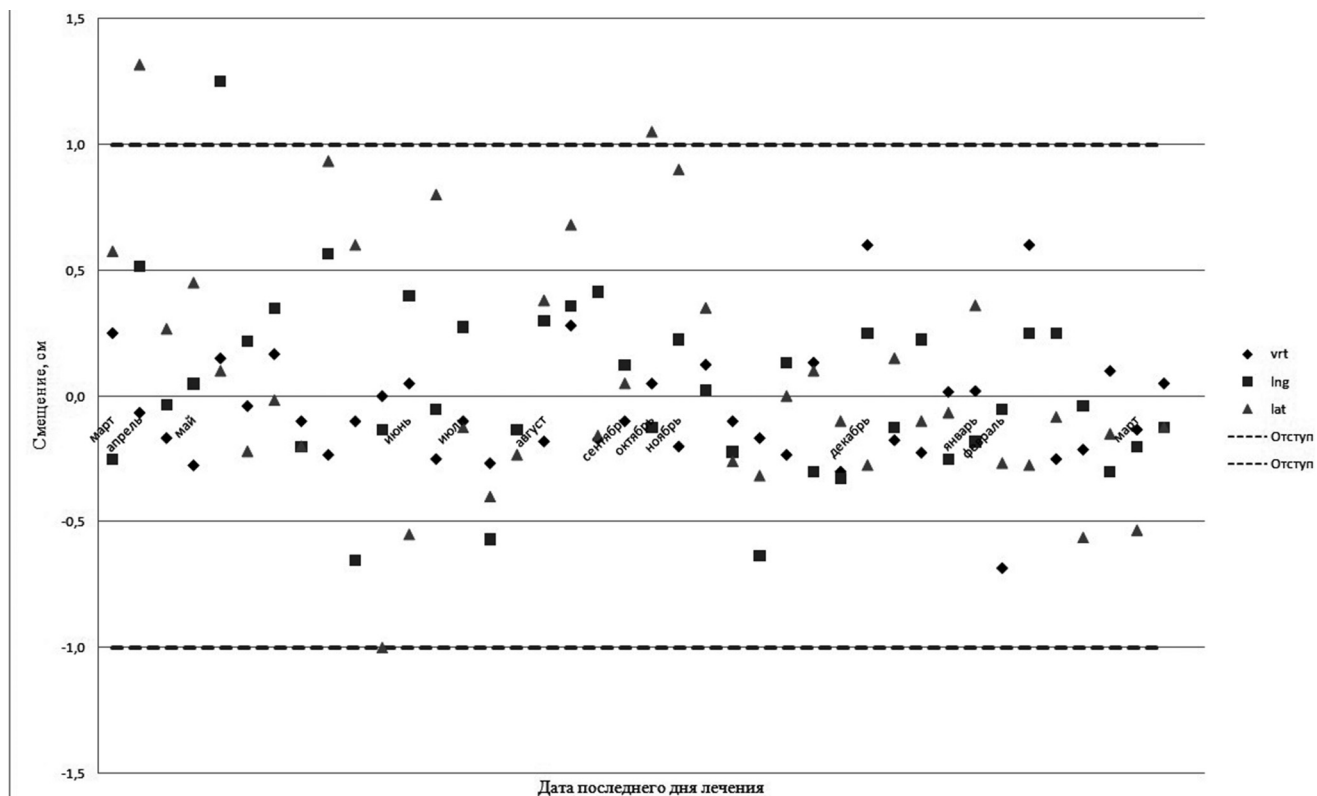
3. На рис. 3 приведена зависимость среднего значения смещений укладки пациента без первых трех дней от даты последнего дня лече-

ния для мишеней, локализованных в области таза.

Данный рисунок иллюстрирует, с какой вероятностью происходит укладка пациента в неправильное положение в те дни, когда снимки не делаются. Как видно из рис. 3, в случае мишеней, локализованных в области таза, вероятность ошибки крайне мала. Это подтверждает адекватность рассчитанного ранее отступа на точность укладки, который в изменении не нуждался.

## Заключение

1. В начале лечения можно пользоваться значениями отступа на точность укладки, рекомендованными в литературе. Однако в дальнейшем отделению необходимо собрать статистику укладок и понять, нуждаются ли они в изменении.
2. Для пациентов с мишенями, локализованными в области молочной железы, пришлось увеличить отступ на точность укладки с 1 см до 1,2–1,3 см.
3. Для органов малого таза требуется увеличение отступа с 1 до 1,3 см. Также ре-



**Рис. 3.** Среднее смещение без учета первых трех дней для выборки пациентов с мишенями, локализованными в области таза, в зависимости от даты последнего дня лечения: ромбы – vrt, квадрат – lng, треугольники – lat

комендуется учитывать полноту пациентов, и для пациентов с передне-задним размером туловища больше 20–23 см проводить отдельную оценку.

### Список литературы

1. Institute of Physics and Engineering in Medicine. On target: ensuring geometric accuracy in radiotherapy. The Royal College of Radiologists, London. 2008.
2. ICRU Report 50. Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy. ICRU. 1993.
3. ICRU Report 62. Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy, Supplement to ICRU Report No. 50. ICRU. 1999.
4. ICRU Report 71. Prescribing, Recording, and Reporting Electron Beam Therapy. J. ICRU 2004. 1 Vol. 4.
5. ICRU. ICRU Report 83. Prescribing, Recording, and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT). 2010.
6. Van Herk M. Errors and margins in radiotherapy. // Semin. Radiat. Oncol. 200. Vol. 14. № 1. P. 52–64.

### IMAGING IN A TREATMENT BEAM FOR PATIENT SET-UP UNCERTAINTY EVALUATION

I.A. Golovina<sup>1</sup>, J.S. Lebedeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great Politechnical University, St-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> I.P. Pavlov Medical University, St-Petersburg, Russia

Systematic and random uncertainties in patient set-up is considered. For head and neck, breast, pelvis and thorax organ cancers the values of systematic and random uncertainties of set-up margins were calculated.

Key words: radiation therapy, patient set-up, therapy beam, visualization, systematic uncertainties, random uncertainties, portal imaging, set-up margin

E-mail: [zhanna-med.phys@mail.ru](mailto:zhanna-med.phys@mail.ru)