

СТЕРЕОТАКСИЧЕСКАЯ РАДИОХИРУРГИЯ ВЕСТИБУЛЯРНЫХ ШВАННОМ: ЭВОЛЮЦИЯ ФИЛОСОФИИ ЛЕЧЕНИЯ

С.Р. Ильялов¹, А.В. Голанов², С.М. Банов²

¹ООО «Гамма Медтехнологии»; Россия, 249036 Обнинск, ул. Королева, 4;

²отделение радиотерапии и радиохирургии ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России; Россия, 125047 Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

Контакты: Сергей Рустамович Ильялов sergeyilyalov@gmail.com

Вестибулярные шванномы – наиболее частая разновидность опухолей области мостомозжечкового угла. Стереотаксическая радиохирургия входит в арсенал методов лечения данных опухолей наравне с традиционным хирургическим подходом. В России с учетом заболеваемости, превышающей 15 радиохирургических случаев на 1 млн населения в год, ожидаемая потребность в стереотаксической радиохирургии при вестибулярных шванномах составляет более 2 тыс. вмешательств ежегодно.

Стереотаксическая радиохирургия находится на стыке нескольких клинических специальностей: нейрорадиологии, нейрохирургии и радиационной терапии, каждая из которых внесла серьезный вклад в развитие данного метода лечения. Наиболее часто в клинической практике используется кобальтовый аппарат «Гамма-нож», специально предназначенный для воздействия на интракраниальные новообразования. Также применяются современные линейные ускорители электронов и протонные ускорители, обеспечивающие высокую точность и конформность облучения. Опыт применения, накопленный с момента первого применения данного метода в лечении вестибулярных шванном, позволил не только оптимизировать дозы облучения для воздействия на опухоль и прилежащие критические структуры (ствол мозга, внутреннее ухо), но и изучить особенности постлучевых микро- и макроизменений, их влияние на клиническое течение, а также разработать рекомендации по радиохирургии шванном различного размера. Все это способствует высокому уровню контроля роста опухоли и низкой частоте функциональных нарушений, что наряду с хорошей переносимостью и минимальными сроками госпитализации определяет более низкую себестоимость лечения по сравнению с традиционной хирургией и значительный социально-экономический эффект.

Представленная лекция предназначена для нейрохирургов и радиационных терапевтов и посвящена наиболее значимым факторам, повлиявшим на развитие, продвижение и активное применение стереотаксической радиохирургии вестибулярных шванном в клинической практике.

Ключевые слова: стереотаксическая радиохирургия, «Гамма-нож», вестибулярная шваннома, псевдопрогрессия, лицевой нерв, нарушения слуха

Для цитирования: Ильялов С.Р., Голанов А.В., Банов С.М. Стереотаксическая радиохирургия вестибулярных шванном: эволюция философии лечения. Нейрохирургия 2024;26(1):110–22. DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-1-110-122>

Stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas: evolution of the philosophy of treatment

S.R. Ilyalov¹, A.V. Golanov², S.M. Banov²

¹“Gamma Medtechnology” Ltd.; 4 Koroleva St., Obninsk 249036, Russia;

²Radiotherapy and Radiosurgery Department, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Health of Russia; 16 4th Tverskaya-Yamskaya St., Moscow 125047, Russia

Contacts: Sergey Rustamovich Ilyalov sergeyilyalov@gmail.com

Vestibular schwannomas are the most common tumors in the cerebellopontine angle. Stereotactic radiosurgery is included in the armamentarium of methods for treating these tumors along with surgical treatment. Given the annual incidence of more than 15 radiosurgical cases of vestibular schwannomas per 1 million population, the expected need for stereotactic radiosurgery of these tumors in Russia is more than 2000 cases annually.

Stereotactic radiosurgery is located at the intersection of several clinical specialties: neuroradiology, neurosurgery and radiation therapy, each of which has made a significant contribution to the development of this treatment method. The most commonly used for this is the cobalt-based Leksell Gamma Knife, specifically intended for the treatment of intracranial neoplasms. Treatment is also possible with modern linear accelerators and proton accelerators, which provide high accuracy and conformity of irradiation. The experience gained since the first application of this method in the treatment of vestibular schwannomas has made it possible not only to optimize the radiation doses to the tumor and adjacent critical structures (brain stem, inner ear), but also to study the features of post-radiation micro- and macro-changes, their impact on the clinical course, to develop recommendations for radiosurgery with schwannomas of various sizes. All this contributes to high control of tumor growth and a low level of functional disorders, which, along with easy tolerability and minimal hospitalization time, determines lower cost of this treatment compared to the traditional surgical approach and significant social and economic effect.

This lecture is intended for neurosurgeons and radiation therapists and focuses on the most significant factors that influenced the development, promotion and active use of stereotactic radiosurgery of vestibular schwannomas in clinical practice.

Keywords: stereotactic radiosurgery, Gamma Knife, vestibular schwannoma, pseudoprogression, facial nerve, hearing impairment

For citation: Ilyalov S.R., Golanov A.V., Banov S.M. Stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas: evolution of the treatment philosophy. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2024;26(1):110–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-1-110-122>

ВВЕДЕНИЕ

Вестибулярные шванномы (ВШ) составляют от 6 до 10 % всех первичных внутримозговых опухолей и 80 % всех новообразований мостомозжечкового угла [1]. Заболеваемость составляет примерно 10 случаев на 1 млн человек, однако внутри популяции в течение многих лет могут отмечаться заметные колебания — от 5,4 до 23 случаев на 1 млн человек [2]. С момента проведения профессором Л. Лекселлом в 1969 г. первой радиохирургической операции при ВШ аппаратом «Гамма-нож» прошло более полувека [3]. Сейчас стереотаксическая радиохирургия (СРХ) прочно вошла в арсенал методов лечения данных опухолей наряду с традиционным хирургическим подходом. В России ежегодно выявляют более 15 радиохирургических случаев ВШ на 1 млн населения, и ожидаемая потребность в СРХ при этих новообразованиях составляет более 2 тыс. вмешательств в год [4].

Представленная лекция предназначена для нейрохирургов и радиационных терапевтов и посвящена наиболее значимым факторам, повлиявшим на развитие, продвижение и активное применение СРХ ВШ в клинической практике.

РАЗВИТИЕ НЕЙРОВИЗУАЛИЗАЦИИ

Визуализация опухоли и планирование дозного распределения при первых радиохирургических вмешательствах на ВШ осуществлялись на основе пневмоэнцефалографии [5]. Безусловно, данный метод обладал низкой информативностью, помимо прочего представляя только двухмерное изображение. Планирование облучения (расчет дозного распределения) осуществлялось вручную [6]. Тем не менее до 1984 г. Л. Лекселл выполнил радиохирургические вмешательства с помощью «Гамма-ножа» более чем 90 пациентам

с ВШ. С середины 1970-х годов в медицинскую практику стали повсеместно внедряться рентгеновская компьютерная томография, а чуть позже и ядерная магнитно-резонансная томография. Возможность получения послойных изображений и, соответственно, трехмерных моделей мозговых структур и патологических образований расширила возможности СРХ, но качество получаемых изображений оставалось низким. Достаточно отметить, что первые магнитно-резонансные (МР) томографы имели показатель индукции магнитного поля всего 0,005 Тл. В середине 1990-х годов в клиническую практику вошли МР-томографы с индукцией магнитного поля 1,0–1,5 Тл, позволявшие получать уже довольно качественные изображения. И если до 1992 г. было проведено всего 1,5 тыс. радиохирургических вмешательств при ВШ, то к 1995 г. такое же количество операций проводилось уже ежегодно и к 2002 г. их общее количество превысило 21 тыс.

В начале XXI в. произошел качественный скачок в развитии компьютерной техники и программного обеспечения, благодаря внедрению и широкому распространению которых появились принципиально новые возможности: 1) выполнение спиральной компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии (МРТ) высокого разрешения, позволяющих досконально, до мельчайших подробностей визуализировать тонкие интракраниальные структуры — сосуды и черепно-мозговые нервы; 2) внедрение новых режимов сканирования, дающих возможность не только визуализации, но и дифференциальной диагностики многих опухолевых процессов; 3) внедрение в рутинную практику компьютерного планирования облучения, позволяющего максимально повысить качество расчетов дозного распределения и сократить время на его моделирование. Это способствовало еще более интенсивному развитию СРХ в целом

и 6-кратному увеличению числа проведенных радиохирургических вмешательств при ВШ в частности за последующие 20 лет. Стоит подчеркнуть, что перед началом пандемии COVID-19 прирост количества радиохирургических вмешательств по поводу ВШ в мире только на аппаратах «Гамма-нож» составлял около 9 тыс. случаев ежегодно [7]. На сегодняшний день использование МРТ высокого разрешения является «золотым стандартом» визуализации большинства опухолевых процессов в головном мозге и позволяет решать самый широкий спектр задач (табл. 1).

По сути, появление высококачественной нейровизуализации (в первую очередь МРТ, в меньшей степени – спиральная компьютерная томография) так же способствовало развитию СРХ, как в свое время внедрение операционных микроскопов и жесткой интраоперационной фиксации головы пациентов – развитию микронейрохирургии (табл. 2).

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОБИОЛОГИИ

Радиобиологические характеристики ВШ человека *in vivo* впервые оценили на мышах, которым имплантировали взятые у пациентов опухолевые образцы. После этого животных подвергали облучению на аппарате «Гамма-нож» разовыми дозами 10, 20 и 40 Гр. Было установлено, что увеличение дозы облучения до 40 Гр значительно уменьшало объем опухоли и ее васкуляризацию уже через 2 нед после облучения, тогда как при дозе 10 Гр уменьшение объема опухоли было незначительным и изменений в васкуляризации не наблюдалось [8].

Несмотря на высокий уровень контроля роста ВШ после СРХ, у незначительной части пациентов опухоль

может в дальнейшем прогрессивно увеличиваться, что обуславливает необходимость ее хирургического удаления и, соответственно, дает возможность морфологического изучения постлучевых изменений. G.T. Szeifert и соавт. (2004) подробно описали морфологические паттерны, выявляемые в ВШ в различные сроки после СРХ, а именно: коагуляционный некроз в центральной части опухоли, соответствующий наиболее высоким значениям дозы облучения; окружающая его переходная зона с ослабленной тканевой структурой опухолевых клеток и внешняя капсула из живых опухолевых клеток (в соответствии с относительно невысокой краевой дозой). Местами выявляется пролиферация грануляционной ткани с воспалительной клеточной инфильтрацией, что соответствует исходу некротического процесса с последующим замещением рубцовой тканью. Выявляемое повреждение эндотелия с исходом в гиалиноз имеет важное значение с точки зрения нарушения питания опухоли [9].

Следует понимать, что большинство живых клеток по периферии опухоли после облучения теряют свою митотическую активность и в дальнейшем элиминируются путем апоптоза. D.J. Lee и соавт. (2003), помимо аналогичных изменений, описали гиперклеточные области, подобные нормальным необлученным тканям ВШ, а В.Н. Шиманский и соавт. (2018), наоборот, отметили потерю клеточности, нарастание полиморфизма и увеличение количества сетчатых структур [10, 11]. Хотя гистологические особенности облученных ВШ различаются, общих черт, специфичных для радиационно-индуцированных изменений ВШ, не выявлено.

Таблица 1. Современные возможности магнитно-резонансной томографии в радиохирургии

Table 1. Current capabilities of magnetic resonance imaging in radiosurgery

До радиохирургического вмешательства Before radiosurgery	В процессе радиохирургического вмешательства In the process of radiosurgical intervention	После радиохирургического вмешательства After radiosurgery
<ul style="list-style-type: none"> • Установление диагноза, дифференциальная диагностика Diagnosis, differential diagnosis • Оценка естественного роста опухоли Evaluation of natural tumor growth • Оценка особенностей распространения опухоли Assessment of tumor spread features • Уточнение показаний к лечению и прогнозирование возможных рисков Clarification of indications for treatment and prediction of possible risks • Визуализация сопутствующих процессов и их правильная интерпретация Visualization of associated processes and their correct interpretation 	<ul style="list-style-type: none"> • Визуализация патологического очага Visualization of the pathological lesion • Визуализация анатомических структур, в том числе критически важных и радиочувствительных (например, зрительные пути, ствол мозга, подкорковые ядра, структуры внутреннего уха и т. п.) Visualization of anatomical structures, including critical and radiosensitive structures (e. g. visual pathways, brainstem, subcortical nuclei, inner ear structures, etc.). • Дифференциация здоровых и патологических тканей Differentiation of healthy and pathologic tissues 	<ul style="list-style-type: none"> • Оценка динамики изменений основного процесса Assessment of the dynamics of changes in the main process • Оценка динамики изменений сопутствующих процессов Assessment of the dynamics of changes in the associated processes • Уточнение показаний к повторному облучению или к хирургии Clarification of indications for re-irradiation or surgery

Таблица 2. Основы сходства между микронейрохирургией и нейрорадиохирургией

Table 2. The basics of similarity between microneurosurgery and neuroradiosurgery

Микронейрохирургия Microneurosurgery	Нейрорадиохирургия Neuroradiosurgery
Жесткая фиксация головы (скоба Мэйфилда) Rigid fixation of the head (Mayfield brace)	Жесткая фиксация головы (стереотаксическая рама Лекселла или индивидуальная термопластическая маска) Rigid fixation of the head (stereotactic Lexell frame or individual thermoplastic mask)
Операционный микроскоп Operating microscope	МРТ высокого разрешения в режиме градиентного эха: High-resolution MRI in gradient echo mode: – T1 (SPGR, FFE) – 1 мм, с контрастным усилением или без него ± FatSat T1 (SPGR, FFE) – 1 mm, with or without contrast enhancement ± FatSat – T2 (FIESTA, CISS) – 0,5–1 мм T2 (FIESTA, CISS) – 0.5–1 mm СКТ в режиме «костного» окна – 0,5–1 мм SCT in the «bone» window mode – 0.5–1 mm

Примечание. МРТ – магнитно-резонансная томография, СКТ – спиральная компьютерная томография.

Note. MRI – magnetic resonance imaging; SCT – spiral computed tomography.

ИЗМЕНЕНИЕ ДИАПАЗОНА ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ДОЗ

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. большинство радиохирургических центров мира использовали диапазон доз 18–20 Гр по краю опухоли при облучении ВШ. При этом отмечался высокий (до 21 %) уровень стойкой постлучевой дисфункции лицевого нерва. К началу 2000-х годов применяемый в клинической практике диапазон доз был снижен – сначала до 16 Гр, а в последующем – до 12–13 Гр по краю опухоли. Такой подход позволил снизить частоту постлучевой фациальной нейропатии до приемлемого уровня (<1 %) [12].

В целом ВШ являются относительно радиорезистентными опухолями, что требует более высоких доз облучения, однако необходимый баланс между высоким уровнем контроля роста и минимальным уровнем функциональной дисфункции достигается при СРХ с относительно невысокой краевой дозой 12–13 Гр (при однофракционном облучении). Контроль опухолевого роста после облучения достигается в 96–98 % случаев. Применение разовых доз >14 Гр повышает риск тригеминальной и фациальной дисфункции. Объем опухоли при планировании (gross tumor volume, GTV) включает контрастируемую часть опухоли (определяется по данным МРТ в режиме T1 с контрастным усилением), а клинический объем (clinical tumor volume, CTV) равен GTV с минимальным краевым захватом (0–2 мм) в зависимости от степени иммобилизации головы пациента (стереотаксическая рама или термопластическая маска) [13–15].

Для минимизации риска последующего снижения слуха необходимо стремиться к максимально возможному снижению средней дозы в улитке, которая не должна превышать 4,2 Гр [16]. Применение краевой дозы 12 Гр позволяет также минимизировать лучевую нагрузку на ствол мозга, допустимое значение которой составляет ≥12 Гр на объем ствола мозга ≤30–50 мм³ [17].

Таким образом, изменение клинического подхода в сторону уменьшения краевой дозы (вопреки относительной радиорезистентности ВШ) позволило обеспечить оптимальное сочетание максимально высокой эффективности и очень низкого уровня функциональных осложнений.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПСЕВДОПРОГРЕССИИ

Пожалуй, важнейшей особенностью ВШ после облучения является их склонность к транзиторному увеличению размеров, так называемой псевдопрогрессии (ПП). Постлучевое увеличение ВШ было описано В.Е. Pollock в 2006 г., однако упоминания об этом феномене встречались и ранее [18, 19]. С. Delsanti и соавт. (2008) выявили увеличение опухоли у 57,1 % больных, в том числе более чем на 30 % (максимально до 200 %) у 29,2 % пациентов. Авторы пришли к выводу, что непрерывное увеличение объема ВШ через 3 года после СРХ (больше, чем в день лечения и на момент предыдущего контроля) следует рассматривать как неэффективность лечения, и предложили осуществлять отсроченное наблюдение за пациентами в сроки 5, 7 и 10 лет [20].

В целом вплоть до недавнего времени доминировало представление о типичном течении ПП в течение 2 лет после проведенной СРХ. Более длительное ее течение или увеличение объема ВШ более чем на 20 % некоторыми авторами расценивалось как продолженный рост опухоли и как показание к повторному облучению или удалению опухоли [21, 22]. Позднее J. Regis и соавт. (2017) отметили, что ПП может иметь более затяжное течение и средний срок ее продолжительности может составлять до 3–4 лет [23]. J. Breshear и соавт. (2019), изучив динамику ПП ВШ, установили, что опухоли, изначально увеличивающиеся в размерах через 1–3 года после СРХ, с 90 % достижением пика объема в течение 3,5 года после лечения, в конечном

итоге начинают уменьшаться при более длительном наблюдении (45 % через 4 года, 77 % – через 6 лет). На основании этого авторы пришли к выводу, что увеличение опухоли в течение примерно 3,5 года после лечения не должно являться единственным критерием для принятия решения о повторном лечении (удалении или повторном облучении) [24].

Опыт НМИЦ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко (2022) также показал, что пик постлучевого увеличения объема ВШ в среднем приходится на 3-й год наблюдения, а средняя продолжительность ПП составляет около 4 лет. При этом в 62,6 % случаев ПП имеет привычное короткое (типичное) течение (развитие и последующий регресс ПП в течение первых 2 лет после облучения), но в 37,4 % встречается затяжное (пролонгированное) течение (развитие и последующий регресс ПП в течение более чем 2 лет после облучения) (рис. 1).

После прохождения пика максимального увеличения, с появлением тенденции к обратному уменьшению, через 5 лет наблюдения у 15,4 % пациентов данной подгруппы еще сохранялось увеличение объема опухоли от 10 до 20 % и у 15,4 % – от 20 до 50 %. Кроме этого, более чем в 3 % случаев возможно даже атипичное развитие ПП (отсроченное развитие после первоначального уменьшения ВШ) (рис. 2) [25].

Наблюдения атипичного течения ПП опубликованы также и другими авторами [26, 27]. Таким образом, расширение представления об особенностях течения ПП не только обуславливает необходимость более тщательной и взвешенной оценки постлучевых изменений, но и приводит к переоценке показаний к хи-

рургическому удалению ВШ после облучения и положений о целесообразности повторной СРХ.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ МОНИТОРИНГ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЕЧЕНИЯ

Один из важнейших принципов проведения СРХ – осуществление последующего регулярного наблюдения за пациентами с оценкой контроля опухолевого роста и функциональных исходов. Это позволило накопить обширную доказательную базу эффективности данного метода и достоверности ближайших и отдаленных результатов. Например, на основании опубликованных данных сформулированы рекомендации по лечению наиболее мелких ВШ, локализирующихся во внутреннем слуховом проходе (интрамеатально) (табл. 3).

Если при динамическом наблюдении интрамеатальной ВШ без первичной потери слуха в дальнейшем выявляется развитие тугоухости даже легкой степени и/или появляются признаки увеличения опухоли по данным МРТ, методом выбора является СРХ [28].

С.Н. Breivick и соавт. (2013) в сравнительном исследовании показали, что при динамическом наблюдении в течение 8 лет после диагностирования ВШ вероятность дальнейшего лечения составляет 96 %, в то время как после радиохирургии – только 2,2 % ($p < 0,001$) [29]. J. Regis и соавт. (2010) в сравнительном исследовании выявили достоверно нарастающее в течение 5 лет преимущество СРХ перед динамическим наблюдением при сочетанной оценке контроля роста опухоли и сохранности функционального слуха начиная со 2-го года наблюдения [30].

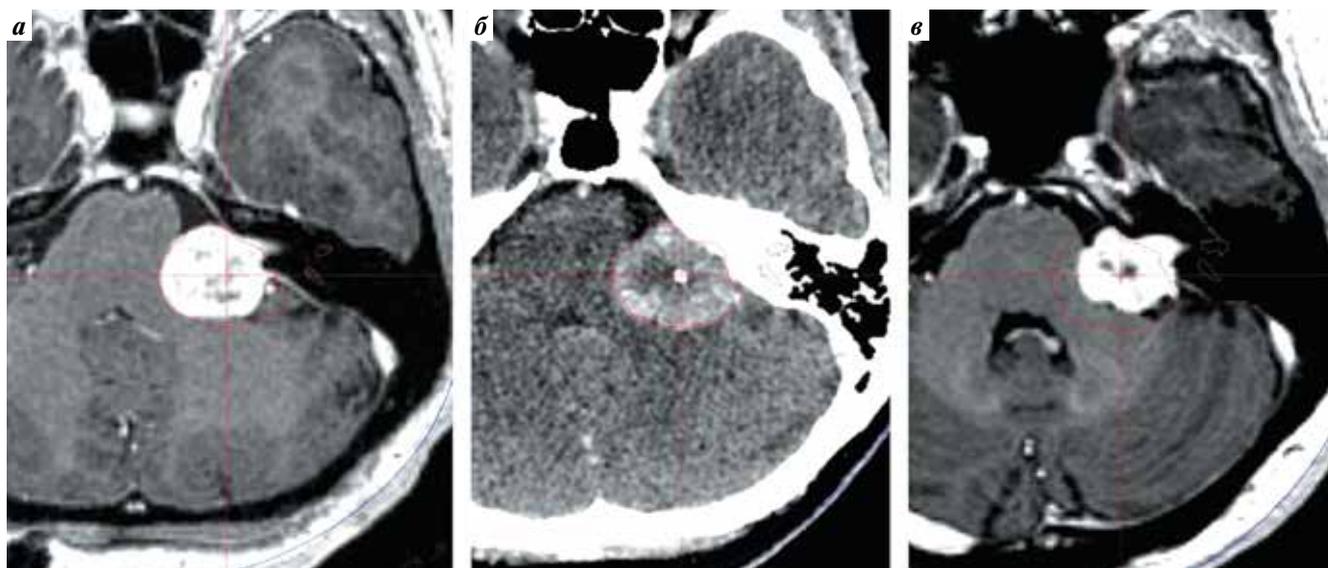


Рис. 1. Магнитно-резонансные и спиральные компьютерные томограммы. Затяжное течение типичной псевдопрогрессии вестибулярной шванномы после стереотаксической радиохирургии (СРХ): а – на момент проведения СРХ: объем опухоли 6,2 см³; б – через 5,5 года после СРХ: объем опухоли 9,1 см³; в – через 10 лет после СРХ: объем опухоли 3,9 см³

Fig. 1. Magnetic resonance and spiral computed imaging. Protracted course of a typical vestibular schwannoma pseudoprogression after stereotactic radiosurgery (SRS): а – at the time of SRS: tumor volume 6.2 cm³; б – 5.5 years after SRS: tumor volume 9.1 cm³; в – 10 years after stereotactic SRS: tumor volume 3.9 cm³

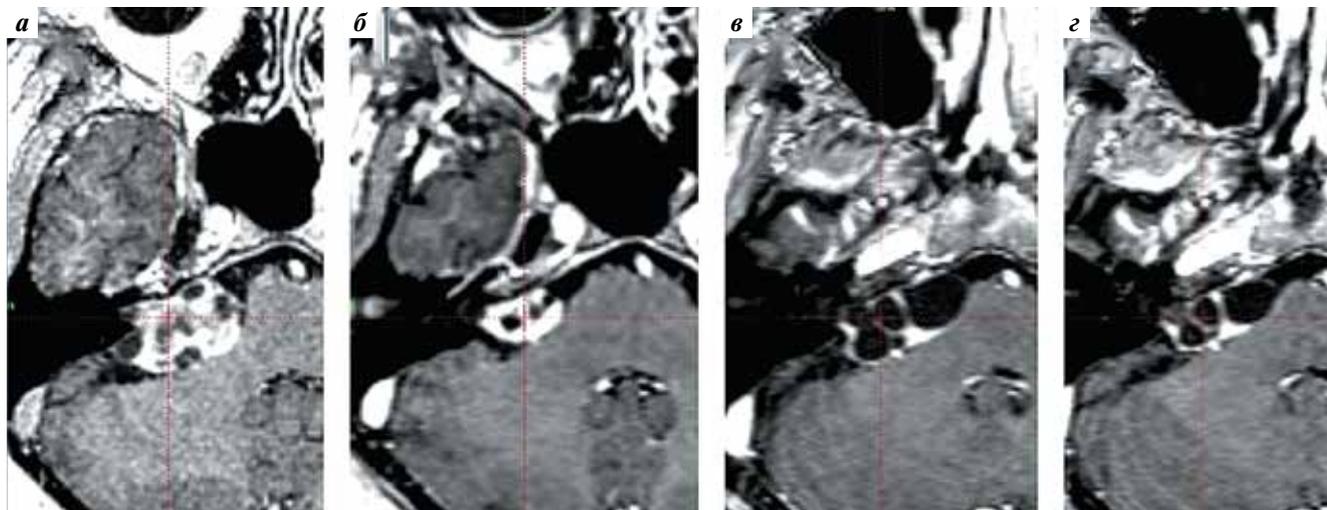


Рис. 2. Магнитно-резонансные томограммы вестибулярной шванномы. Атипичная псевдопрогрессия вестибулярной шванномы после стереотаксической радиохирургии (СРХ): а — на момент проведения СРХ: объем опухоли 7,4 см³; б — через 2 года после СРХ: уменьшение объема опухоли до 1,5 см³; в — через 4 года: увеличение объема до 8,0 см³; г — через 4,5 года: уменьшение объема до 5,0 см³

Fig. 2. Magnetic resonance imaging of vestibular schwannoma. Atypical pseudoprogression of vestibular schwannoma after stereotactic radiosurgery (SRS): а — at the time of SRS: tumor volume is 7.4 cm³; б — 2 years after SRS: a decrease in volume to 1.5 cm³; в — after 4 years: an increase in volume to 8.0 cm³; г — after 4.5 years: a decrease in volume to 5.0 cm³

Таблица 3. Тактика лечения впервые выявленных интрамеатальных вестибулярных шванном (ВШ)

Table 3. Treatment tactics for newly diagnosed intrameatal vestibular schwannomas (VS)

При отсутствии нарушения слуха With no hearing impairment	При частичном снижении слуха With partial hearing impairment	При полной потере слуха With total hearing loss
<ul style="list-style-type: none"> • Наблюдение — метод выбора (уровень доказательности III, уровень рекомендации C) Follow-up is the method of choice (evidence level III, recommendation grade C) • Радиохирургия — альтернатива наблюдению для контроля роста опухоли и сохранности функции черепно-мозговых нервов в долгосрочной перспективе. Существует небольшой риск ухудшения функции черепных нервов или качества жизни (уровень доказательности II, уровень рекомендации B) Radiosurgery is an alternative to observation to control tumor growth and preserve cranial nerves' function in the long term. There is a small risk of worsening cranial nerve's function or quality of life (evidence level II, recommendation grade B) • Хирургия — не рекомендуется (уровень доказательности III, уровень рекомендации C) Surgery is not recommended (evidence level III, recommendation grade C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Радиохирургия — метод выбора, поскольку обладает лучшим уровнем сохранения слуха и меньшим риском развития пареза лица, чем микрохирургия (уровень рекомендации C) Radiosurgery is the method of choice because it has better hearing preservation and less risk of facial paresis than microsurgery (recommendation grade C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Наблюдение — метод выбора (уровень доказательности III, уровень рекомендации C) Follow-up is the method of choice (evidence grade III, recommendation grade C) • Радиохирургия или хирургия имеют низкий риск повреждения лицевого нерва и могут обеспечить долгосрочный контроль роста опухоли или излечение соответственно, но учитывая большую безопасность радиохирургии, она предпочтительнее, если как основная цель лечения рассматривается контроль роста опухоли (уровень доказательности II; уровень рекомендации B) Radiosurgery or surgery has low risk of damage to the facial nerve and can provide long-term tumor growth control or cure, respectively; however, given the greater safety, radiosurgery is preferred if tumor growth control is considered the primary treatment goal (evidence level II, recommendation grade B)

Основные риск-факторы нарушения слуха при динамическом наблюдении — непосредственное разрушение слуховых волокон в результате роста опухоли и опосредованное их повреждение за счет повышения интрамеатального давления в результате тампонады опухолью внутреннего слухового прохода. После СРХ важными факторами являются выраженность и продолжительность ПП, на фоне которой не только повышается интрамеатальное давление, но и возрастает

уровень протеинов в эндолимфатической жидкости кортиева органа (улитки внутреннего уха), что приводит к увеличению ее вязкости. Также к факторам риска относятся превышение краевой дозы на опухоль >13 Гр и превышение средней дозы на кортиев орган >4,2 Гр [31–34].

Традиционно при описании ВШ используют 2 основные классификации: по I.V. Koos, в основу которой положен максимальный размер опухоли, и по M. Samii,

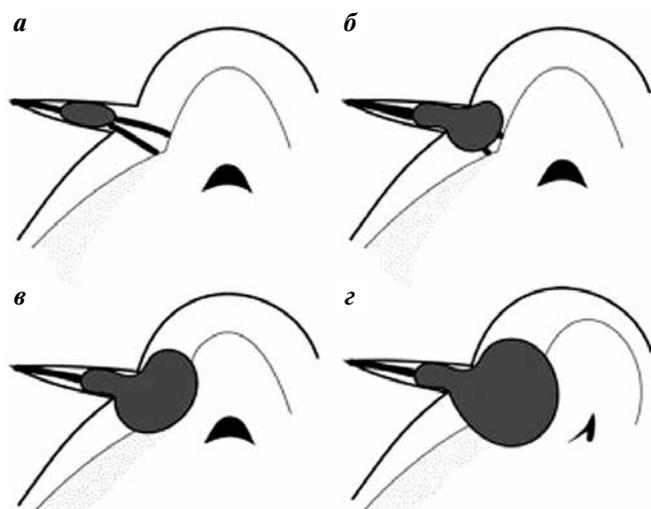


Рис. 3. Классификация вестибулярных шванном (ВШ) по Т. Hasegawa и соавт.: а – интрамеатальные ВШ (тип А); б – ВШ, распространяющиеся в мостомозжечковую цистерну, но без компрессии ствола мозга (тип В); в – ВШ с компрессией ствола мозга, но без деформации IV желудочка (тип С); г – ВШ с компрессией ствола мозга и деформацией просвета IV желудочка (тип D)

Fig. 3. Classification of vestibular schwannomas (VS) according to T. Hasegawa et al.: а – intrameatal VS (type A); б – VS extending into the pontocerebellar cistern, but without brainstem compression (type B); в – VS with brainstem compression, but without deformation of the 4th ventricle (type C); г – VS with brainstem compression and deformation of the 4th ventricle (type D)

основанную на визуальной оценке отношения ВШ к стволу мозга по данным МРТ. Т. Hasegawa и соавт. (2013) использовали собственную классификацию ВШ, которая по сути представляет собой упрощенный вариант оценки по М. Samii, объединяя в группу В сразу 3 стадии по М. Samii: Т2, Т3а и Т3б (рис. 3) [35].

По данным этих авторов, в зависимости от типа опухоли выживаемость без прогрессии в течение ≥ 10 лет составляет 100 % при опухолях типа А, 95 % – при опухолях типа В, 92 % – при опухолях типа С и 76 % – при опухолях типа D. Контроль роста опухолей типа D значительно хуже по сравнению с опухолями типа С ($p = 0,004$), тогда как достоверной разницы между опухолями типов В и С нет ($p = 0,33$). Контроль роста ВШ типа D значительно хуже по сравнению с объединенной группой А, В и С ($p < 0,0001$). Представляется, что классификация Т. Hasegawa и соавт., которая не нашла широкого применения, тем не менее является удобной именно в радиохирургической практике, так как с точки зрения радиохирургии нет разницы ни в определении показаний к лечению, ни в контроле роста ВШ внутри групп В и С, а также отсутствуют технические различия в проведении СРХ [35].

Отдаленные результаты контроля роста ВШ на протяжении ≥ 9 лет наблюдения неоднократно описаны в литературе. Эти показатели оставляют 88–100 % и сопоставимы с результатами длительного (> 15 лет) наблюдения после хирургического удаления (табл. 4) [36–41].

Кроме контроля роста принципиально важное значение имеет максимальное сохранение функции нервов мостомозжечковой группы (V, VII и VIII), наиболее часто вовлеченных в опухолевый процесс. Ретроспективные исследования показали существенное преимущество СРХ не только в сохранении функции лицевого нерва, но и в достижении сохранности функционального слуха. Тройничный нерв наименее подвержен риску постлучевой дисфункции (см. табл. 4).

По данным метаанализа, проведенного М. L. Carlson и соавт. (2018), в краткосрочной перспективе (2 года) СРХ обеспечивает высокую вероятность (> 75 –100 %) сохранения функционального слуха и умеренно высокую вероятность (> 50 –70 %) общего сохранения слуха. В среднесрочной перспективе (5 лет) сохранение функционального слуха, так же как и общее сохранение слуха, имеют умеренно высокую вероятность (> 50 –70 %). Эти результаты заметно лучше функциональных исходов хирургического удаления ВШ малого и среднего размеров. При длительности наблюдения 10 лет сохранность функционального слуха и общая сохранность слуха после СРХ имеют умеренно низкую вероятность (> 25 –50 %) (табл. 5). Во всех случаях прогностически благоприятным фактором является исходно хороший предоперационный порог распознавания речи и/или чистых тонов [42].

Известно, что функциональные исходы, прежде всего для VII и VIII пар черепных нервов, существенно хуже при тотальном удалении ВШ большого размера, чем при субтотальной резекции [43–45]. Однако субтотальное удаление связано с более высоким риском продолженного роста остаточной опухоли (табл. 6) [46].

В свою очередь широкое применение СРХ при лечении крупных ВШ (Коос IV, Samii Т4, Hasegawa D), исходно вызывающих сдавление ствола мозга и IV желудочка, как правило, ограничено риском развития постлучевой ПП на фоне недостаточности резервных ликворных пространств в задней черепной ямке, что может приводить к клинически значимой компрессии ствола и мозжечка, в некоторых случаях – к окклюзионной гидроцефалии с развитием внутричерепной гипертензии и ухудшением состояния пациента. Указанные недостатки обоих методов лечения в настоящее время компенсируются проведением комбинированного лечения: частичным хирургическим (интракапсулярным) удалением опухоли, достаточным для устранения масс-эффекта и обеспечения сохранности лицевого нерва, с последующей СРХ остаточной части опухоли [47].

С учетом того, что ПП наблюдается не у всех пациентов, возможна и противоположная тактика лечения крупных ВШ, когда сначала проводится СРХ. В этом случае имеется вероятность (> 50 %), что опухоль уменьшится либо минув стадию ПП, либо с незначительным увеличением и бессимптомным

Таблица 4. Сравнение показателей контроля роста вестибулярных шванном и отдаленных функциональных результатов при хирургическом и радиохирургическом лечении
Table 4. Comparison of growth control rates of vestibular schwannomas and long-term functional results in microsurgical and radiosurgical treatment

Авторы, год Authors, year	Вид лечения Treatment	Число пациен- тов, n Number of patients, n	Средний объем опухоли, см ³ Average tumor volume, cm ³	Доза по краю опу- холи, Гр Dose to tumor margin, Gy	Период наблюдения, лет Observation period, years	Улучшение слуха, % Hearing improvement, %	Сохранность слуха, % Hearing preservation, %	Сохранность функциональ- ного слу- ха, % Functional hearing preservation, %	Сохран- ность мимики, % Mimicry preservation, %	Сохран- ность чувст- вительнос- ти, % Sensation preservation, %	Контроль роста опухо- ли, % Tumor growth control, %
M.E. Sughrie и соавт., 2010 [36] M.E. Sughrie et al., 2010 [36]	МХ MS	204	н. д. n. d.	–	15	н. д. n. d.	44–68	н. д. n. d.	52–76	н. д. n. d.	89
W.Y. Chung и соавт., 2005 [37] W.Y. Chung et al., 2005 [37]	ГН GK	195	4,1	11–18,2	10	н. д. n. d.	н. д. n. d.	60	99,9	99,9	93,6
L.D. Lunsford и соавт., 2005 [38] L.D. Lunsford et al., 2005 [38]	ГН GK	869	2,5	12–13	>10	1,5	70,3	78,6	100	95,6	98
T. Hasegawa и соавт., 2013 [35] T. Hasegawa et al., 2013 [35]	ГН GK	440	2,8	10–18	>10	н. д. n. d.	34	н. д. n. d.	97	99,9	92
S. Watanabe и соавт., 2016 [40] S. Watanabe et al., 2016 [40]	ГН GK	183	2,0	8,8–15	>9	н. д. n. d.	н. д. n. d.	35	99	н. д. n. d.	88
P. Anselmo и соавт., 2020 [41] P. Anselmo et al., 2020 [41]	ЛЮЭ Linac	48	1,7	13–20	12	н. д. n. d.	н. д. n. d.	91	89	90	100

Примечание. МХ – микрохирургия; ГН – «Гамма-нож»; ЛЮЭ – линейный ускоритель электронов; н. д. – нет данных.
Note. MS – microsurgery; GK – Gamma Knife; Linac – linear accelerator; n. d. – no data available.

Таблица 5. Сравнение результатов сохранения слуховой функции при динамическом наблюдении, хирургическом и радиохирургическом лечении вестибулярных шванном (по данным M. L. Carlson и соавт., 2018 [42])**Table 5.** Comparison of hearing function preservation results with follow-up, microsurgical and radiosurgical treatment of vestibular schwannomas (according to M. L. Carlson et al., 2018 [42])

Показатель Parameter	Динамическое наблюдение Follow-up	Хирургия Surgery	Радиохирургия Radiosurgery
Общая вероятность сохранения функционального слуха Overall probability of functional hearing preservation	<ul style="list-style-type: none"> 2 года: высокая (>75–100 %) 2 years: high (>75–100 %) 5 лет: умеренно высокая (>50–75 %) 5 years: moderate high (>50–75 %) 10 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 10 years: moderate low (>25–50 %) 	<ul style="list-style-type: none"> после операции: умеренно низкая (>25–50 %) after surgery: moderately low probability (>25–50 %) 2 года: умеренно низкая (>25–50 %) 2 years: moderate low (>25–50 %) 5 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 5 years: moderate low (>25–50 %) 10 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 10 years: moderate low (>25–50 %) (только для опухолей малого и среднего размера) (for small/medium sized tumors only)	<ul style="list-style-type: none"> 2 года: умеренно высокая (>50–75 %) 2 years: moderate high (>50–75 %) 5 лет: умеренно высокая (>50–75 %) 5 years: moderate high (>50–75 %) 10 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 10 years: moderate low (>25–50 %)
Общая вероятность сохранения функционального слуха среди пациентов с исходным слухом по ААО-HNS класса А или по GR класса I Probability of functional hearing preservation among patients with baseline hearing loss AAO-HNS class A or GR class I	<ul style="list-style-type: none"> 2 года: высокая (>75–100 %) 2 years: high (>75–100 %) 5 лет: умеренно высокая (>50–75 %) 5 years: moderate high (>50–75 %) 10 лет: недостаточно данных для определения вероятности 10 years: insufficient data to define the parameter 	<ul style="list-style-type: none"> после операции: умеренно высокая (>50–75 %) after surgery: moderate high (>50–75 %) 2 года: умеренно высокая (>50–75 %) 2 years: moderate high (>50–75 %) 5 лет: умеренно высокая (>50–75 %) 5 years: moderate high (>50–75 %) 10 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 10 years: moderate low (>25–50 %) (только для опухолей малого и среднего размера) (for small/medium sized tumors only)	<ul style="list-style-type: none"> 2 года: высокая (>75–100 %) 2 years: high (>75–100 %) 5 лет: умеренно высокая (>50–75 %) 5 years: moderate high (>50–75 %) 10 лет: умеренно низкая (>25–50 %) 10 years: moderate low (>25–50 %)

Примечание. ААО-HNS – классификация Американской академии отоларингологии – хирургии головы и шеи (American Academy of Otolaryngology – Head and Neck Surgery); GR – классификация Gardner–Robertson.

Note. AAO-HNS – classification of the American Academy of Otolaryngology – Head and Neck Surgery; GR – Gardner–Robertson classification.

Таблица 6. Контроль роста вестибулярных шванном (ВШ) после тотального и субтотального удаления (по данным H. Nakatomi и соавт., 2017 [46]), %**Table 6.** Growth control rates of vestibular schwannomas (VS) after total and subtotal removal (according to H. Nakatomi et al., 2017 [46]), %

Радикальность удаления Removal radicality	Контроль роста ВШ по периодам наблюдения, % Growth control rates of VS by period of observation, %			
	5 лет 5 years	10 лет 5 years	15 лет 5 years	20 лет 5 years
Тотальное Total	96	82	73	56
Субтотальное Subtotal	47	17	8	–

течением ПП. При этом СРХ крупных ВШ демонстрирует стабильно высокий уровень сохранности функции лицевого нерва, а также высокие шансы на сохранение функционального слуха (табл. 7) [48–53].

Контроль роста при СРХ крупных ВШ составляет от 84 до 98,3 %. Хирургическое удаление показано только при развитии грубых симптомов мозжечковой атаксии и повышенного внутричерепного давления, связанных с ПП. При этом решение об операции должно быть тщательно обосновано, поскольку постлучевое увеличение регрессирует естественным образом, а сама резекция должна быть ограничена субтоталь-

ным удалением для максимальной функциональной сохранности (рис. 4) [21, 54–57].

В целом даже многократное увеличение объема ВШ после СРХ, протекающее бессимптомно, не служит показанием к хирургическому лечению, однако требует продолжения динамического наблюдения. L. F. Li и соавт. (2020) описали случай длительного наблюдения пациентки с исходно относительно небольшой (8 см³) ВШ, которая через 2 года после СРХ увеличилась на 161 % (до 20,9 см³), но без значимого ухудшения неврологического статуса. Последующее наблюдение (в течение 19 лет) показало сначала

Таблица 7. Результаты радиохирургического лечения крупных вестибулярных шванном

Table 7. Radiosurgical treatment results for large vestibular schwannomas

Авторы, год Authors, year	Количество наблюдений, n Number of observations, n	Медиана наблюдения, мес Median follow-up, months	Контроль роста опухоли (уменьшение), % Tumor growth control (shrinkage), %	Сохранность функционального слуха, % Functional hearing preservation, %	Сохранность функции лицевого нерва, % Facial nerve function preservation, %
W.-Y. Chung и соавт., 2010 [48] W.-Y. Chung et al., 2010 [48]	21	53	90,5	—	100
R. van de Langenberg и соавт., 2011 [49] R. van de Langenberg et al., 2011 [49]	33	30	88,0	58	91
M. Bailo и соавт., 2016 [50] M. Bailo et al., 2016 [50]	59	74	98,3 (86,4)	—	94,9
M. Lefranc и соавт., 2018 [51] M. Lefranc et al., 2018 [51]	86	79	90,7 (70,0)	65,8	100
S. Watanabe и соавт., 2019 [52] S. Watanabe и соавт., 2019 [52]	30	98	84,0 (72,0)	0	100
D. Stastna и соавт., 2021 [53] D. Stastna и соавт., 2021 [53]	73	66	87,7 (83,6)	55	95,9

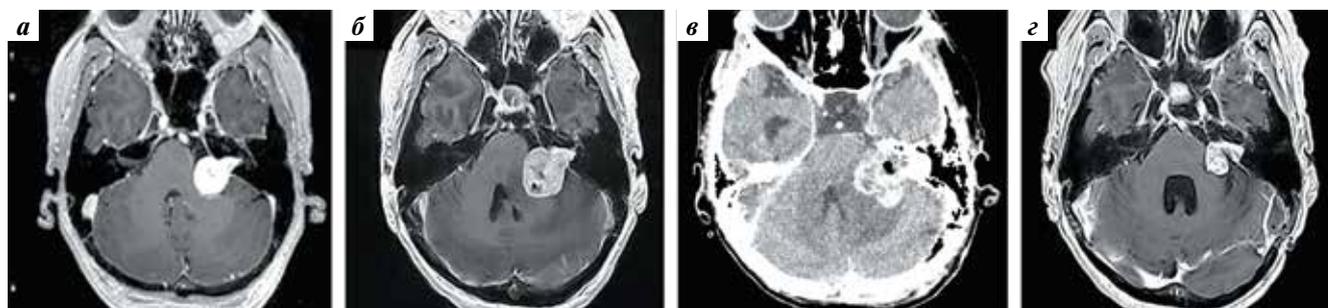


Рис. 4. Данные магнитно-резонансной и спиральной компьютерной томографии, свидетельствующие об эффективности и безопасности частичного удаления опухоли на фоне выраженной постлучевой псевдопрогрессии: а – вестибулярная шваннома на момент проведения стереотаксической радиохирургии (СРХ): объем опухоли 6,2 см³ (тугоухость II степени, 1 балл по шкале Хауса–Брекманна); б – через 20 мес после СРХ: объем опухоли 11,0 см³ (тугоухость III степени, 1 балл по шкале Хауса–Брекманна, перифокальный отек, гидроцефалия); в – через 24 мес после СРХ, частичного удаления опухоли и вентрикуло-перитонеального шунтирования: объем опухоли 9,8 см³; г – 11 мес после операции: объем образования 2,8 см³ (тугоухость III степени, 1 балл по шкале Хауса–Брекманна, регресс гидроцефалии)

Fig. 4. Magnetic resonance and spiral computed tomography data indicating the efficacy and safety of partial tumor resection against the background of severe post-radiation pseudoprogression: a – vestibular schwannoma at the time of stereotactic radiosurgery (SRS): tumor volume 6.2 cm³ (hearing loss 2 stage, House–Breckmann grade 1); б – 20 months after SRS: tumor volume 11.0 cm³ (hearing loss 3 grade, House–Breckmann grade 1, perifocal edema, hydrocephalus); в – 24 months after SRS, partial tumor removal and ventriculo-peritoneal bypass: tumor volume 9.8 cm³; г – 11 months after surgery: significant tumor reduction – 2.8 cm³ (hearing loss 3 grade, House–Breckmann grade 1, regression of edema and hydrocephalus)

уменьшение объема ВШ до 1,0 см³, что равнялось 12,5 % объема опухоли до лечения или 4,8 % пикового объема опухоли после лечения, а затем и стабильный контроль опухоли. Авторы сделали вывод, что на фоне бессимптомного течения ПП следует избегать преждевременных решений о хирургическом удалении образования после облучения, так как опухоль может в дальнейшем значительно уменьшиться самостоятельно [58].

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Неоспоримым преимуществом СРХ ВШ является отсутствие необходимости в длительной госпитализа-

ции, анестезиологическом сопровождении, послеоперационной реанимации и последующей реабилитации. Все это минимизирует физическую и социальную дезадаптацию пациентов, способствуя максимально быстрому возвращению пациентов к повседневной бытовой и профессиональной активности. В настоящее время однофракционная СРХ ВШ проводится в режиме однодневного стационарирования, что примерно в 8–10 раз короче обычных сроков госпитализации при хирургическом лечении. По данным J. Regis и соавт. (2002), среднее время вынужденного отсутствия на работе после СРХ было примерно в 20 раз короче, чем после операции (7 дней против 130 дней),

при этом к профессиональной активности вернулись 100 % пациентов после радиохирургии и только 56 % — после хирургического вмешательства [59]. O. Berkowicz и соавт. (2017) по результатам опроса пациентов с ВШ, перенесших СРХ (аппарат «Гамма-нож»), в среднем через 5 лет после вмешательства, выяснили, что 91,1 % пациентов удовлетворены функциональным результатом и уровнем своей повседневной активности, а 96,8 % готовы рекомендовать данный вид лечения своим родным и друзьям в случае диагностирования у них такой опухоли [60]. Все вышесказанное объясняет тот факт, что себестоимость лечения ВШ радиохирургическим методом примерно в 1,8 раза ниже, чем традиционным хирургическим путем [61].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стереотаксическая радиохирургия ВШ — методика лечения, берущая начало в середине XX в. и получившая обоснованную популярность по мере своего раз-

вития. Данный метод находится на стыке нескольких клинических специальностей и вобрал в себя наиболее полезные их характеристики: от нейрорадиологии — детальную анатомическую визуализацию внутричерепных структур; от нейрохирургии — точность и «деликатность» воздействия; от радиационной терапии — высокую эффективность и безопасность. Накопленный в течение десятилетий опыт применения позволил оптимизировать дозы облучения ВШ, изучить особенности постлучевых микро- и макроструктурных изменений и их влияние на клиническое течение, разработать рекомендации по СРХ ВШ различного размера. Все это способствует высокой результативности и безопасности лечения пациентов с данной патологией и наряду с легкой переносимостью и минимальными сроками госпитализации определяет меньшую себестоимость данного лечения в сравнении с традиционным хирургическим подходом и значительный социально-экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Caye-Thomasen P., Stangerup S.-E. Epidemiology of vestibular schwannoma. In: *Comprehensive management of vestibular schwannoma*. Ed. by M.L. Carlson. NY: Thieme, 2019. Pp. 14–17. DOI: 10.1055/b-0039-169179
2. Stangerup S.-E., Caye-Thomasen P. Epidemiology and natural history of vestibular schwannomas. *Otolaryngol Clin N Am* 2012;45(2):257–68, vii. DOI: 10.1016/j.otc.2011.12.008
3. Leksell L. A note on the treatment of acoustic tumors. *Acta Chir Scand* 1971;137(8):763–5.
4. Faramand A., Lunsford L.D., Regis J., Liscak R. Gamma Knife radiosurgery: a review of epidemiology and practice. 2020. Available at: <https://www.elekta.com/medical-affairs/bibliographies/LGKS%20Review%20of%20epidemiology.pdf>.
5. Lindquist C. Gamma Knife surgery: evolution and long-term results. In: *Radiosurgery 1999*. Ed. by D. Kondziolka, S. Karger. Vol. 3. Basel: Karger, 2000. Pp. 1–12.
6. Костюченко В.В. История стереотаксиса и радиохирургии. В кн.: *Нейрорадиохирургия на Гамма-ноже*. Под ред. В.В. Костюченко, А.В. Голанова. М.: Т.А. Алексеева, 2018. С. 41–173. Kostuchenko V.V. History of stereotaxy and radiosurgery. In: *Neuroradiosurgery with Gamma knife*. Ed. by V.V. Kostjuchenko, A.V. Golanov. Moscow: T.A. Aleskeeva, 2018. Pp. 41–173. (In Russ.).
7. Annual treatment statistics. Leksell Gamma Knife Society. Available at: https://www.lgksociety.com/fileadmin/groups/1/Documents/Treatment_Statistics/2020/1968-2020_Treatment_Report.pdf
8. Linskey M.E., Martinez A.J., Kondziolka D. et al. The radiobiology of human acoustic schwannoma xenografts after stereotactic radiosurgery evaluated in the subrenal capsule of athymic mice. *J Neurosurg* 1993;78(4):645–53. DOI: 10.3171/jns.1993.78.4.645
9. Szeifert G.T., Figarella-Branger D., Roche P.-H., Régis J. Histopathological observations on vestibular schwannomas after Gamma Knife radiosurgery: the Marseille experience. *Neurochirurgie* 2004;50(2–3 Pt 2):327–37.
10. Lee D.J., Westra W.H., Staecker H. et al. Clinical and histopathologic features of recurrent vestibular schwannoma (acoustic neuroma) after stereotactic radiosurgery. *Otol Neurotol* 2003;24(4):650–60; discussion 660. DOI: 10.1097/00129492-200307000-00020
11. Шиманский В.Н., Одаманов Д.А., Рыжова М.В. и др. Морфологические изменения в невриноме слухового нерва после радиологического лечения: опыт ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко». *Вестник Российского научного центра рентгенорадиологии* 2018;18(2):1–20. Shimanskiy V.N., Odamanov D.A., Ryzhova M.V. et al. Morphological changes in acoustic neuromas after radiological treatment: experience of the N.N. Burdenko National Medical Center of Neurosurgery. *Vestnik Rossiyskogo nauchnogo tsentra rentgenoradiologii = Bulletin of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology* 2018;18(2):1–20. (In Russ.).
12. Link M.J., Pollock B.E., Carlson M.L., Foote M.R. Gamma knife radiosurgery for treatment of sporadic vestibular schwannoma. In: *Comprehensive management of vestibular schwannoma*. Ed. by M.L. Carlson. NY: Thieme, 2019. Pp. 91–101. DOI: 10.1055/b-0039-169179
13. Kubicky C.D., Chan L.W., Tsuji S.Y. Central Nervous System. In: *Handbook of Evidence-Based Radiation Oncology*. Ed. by E.K. Hansen, M. Roach. NY: Springer, 2010. Pp. 29–75. DOI: 10.1007/978-0-387-92988-0
14. Голанов А.В., Банов С.В., Ветлова Е.Р. и др. Опухоли центральной нервной системы. В кн.: *Терапевтическая радиология*. Под ред. А.Д. Каприна, Ю.С. Мардынского. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. Доступно по: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970446584.html>
15. Golanov A.V., Banov S.M., Vetlova E.R. et al. Central nervous system tumors. In: *Therapeutic radiology*. Ed. by A.D. Kaprin, Yu.S. Mardynskiy. Moscow: GEOTAR-Media, 2018. (In Russ.). Available at: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970446584.html>
16. Raleigh D.R., Barani I.J., Sneed P. Intracranial tumors. In: *Handbook of evidence-based stereotactic radiosurgery and stereotactic body radiotherapy*. Ed. by R.A. Sethi, I.J. Barani, D.A. Larson, M. Roach 3rd. Springer, 2016. Pp. 41–79. DOI: 10.1007/978-3-319-21897-7
17. Myrseth E., Møller P., Pedersen P.-H., Lund-Johansen M. Vestibular schwannoma: surgery or gamma knife radiosurgery? A prospective, nonrandomized study. *Neurosurgery* 2009;64(4):654–61; discussion 661–3. DOI: 10.1227/01.NEU.0000340684.60443.55

17. Костюченко В.В. Дозиметрическое планирование ПХГН. В кн.: Нейрорадиохирургия на Гамма-ноже. Под ред. В.В. Костюченко, А.В. Голанова М., 2018. С. 351–434. Kostuchenko V.V. GKRS dosimetric planning. In: *Neuroradiosurgery with Gamma knife*. Ed. by V.V. Kostjuchenko, A.V. Golanov. Moscow, 2018. Pp. 351–434. (In Russ.).
18. Pollock B.E. Management of vestibular schwannomas that enlarge after stereotactic radiosurgery: treatment recommendations based on a 15 year experience. *Neurosurgery* 2006;58(2):241–8; discussion 241–8. DOI: 10.1227/01.NEU.0000194833.66593.8B
19. Kondziolka D., Lunsford L.D., McLaughlin M.R., Flickinger J.C. Long-term outcomes after radiosurgery for acoustic neuromas. *New Engl J Med* 1998;339(20):1426–33. DOI: 10.1056/nejm19981123392003
20. Delsanti C., Roche P.-H., Thomassin J.-M., Régis J. Morphological changes of vestibular schwannomas after radiosurgical treatment: pitfalls and diagnosis of failure. *Prog Neurol Surg* 2008;21:93–7. DOI: 10.1159/000156712
21. Шиманский В.Н., Одаманов Д.А., Рыжова М.В. и др. Хирургическая тактика при удалении вестибулярных шванном после стереотаксического радиологического лечения. Результаты операций и морфологические изменения в опухолях после облучения. Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко 2018;82(6):38–52. DOI: 10.17116/neiro20188206138 Shimanskiy V.N., Odamanov D.A., Ryzhova M.V. et al. Surgical approach to resection of vestibular schwannomas following stereotactic radiological treatment. Surgical outcomes and morphological changes in tumors after radiotherapy. *Zhurnal Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2018;82(6):38–52. (In Russ.). DOI: 10.17116/neiro20188206138
22. Lee H.-J., Kim M.J., Koh S.H. et al. Comparing outcomes following salvage microsurgery in vestibular schwannoma patients failing Gamma-knife radiosurgery or microsurgery. *Otol Neurotol* 2017;38(9):1339–44. DOI: 10.1097/MAO.0000000000001536
23. Régis J., Delsanti C., Roche P.-H. Editorial: Vestibular schwannoma radiosurgery: progression or pseudoprogression? *J Neurosurg* 2017;127(2):374–9. DOI: 10.3171/2016.7.JNS161236
24. Breshears J.D., Chang J., Molinaro A.M. et al. Temporal dynamics of pseudoprogression after Gamma Knife radiosurgery for vestibular schwannomas – a retrospective volumetric study. *Neurosurgery* 2019;84(1):123–31. DOI: 10.1093/neuros/nyy019
25. Ильялов С.Р., Банов С.М., Голанов А.В., Усачев Д.Ю. Радиохирургия вестибулярных шванном: динамика ближайших и отдаленных послучевых изменений и контроль опухолевого роста. Журнал «Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко» 2022;86(2):55–63. DOI: 10.17116/neiro20228602155 Ilyalov S.R., Banov S.M., Golanov A.V., Usachev D.Yu. Stereotactic radiosurgery for vestibular schwannoma: early and long-term radiation-induced changes and tumor growth control. *Zhurnal Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2022;86(2):55–63. (In Russ.). DOI: 10.17116/neiro20228602155
26. Frisch C.D., Jacob J.T., Carlson M.L. et al. Stereotactic radiosurgery for cystic vestibular schwannomas. *Neurosurgery* 2017;80(1):112–8. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001376
27. Klijn S., Verheul J.B., Beute G.N. et al. Gamma Knife radiosurgery for vestibular schwannomas: evaluation of tumor control and its predictors in a large patient cohort in The Netherlands. *J Neurosurg* 2016;124(6):1619–26. DOI: 10.3171/2015.4.JNS142415
28. Goldbrunner R., Weller M., Régis J. et al. EANO guideline on the diagnosis and treatment of vestibular schwannoma. *Neuro Oncol* 2020;22(1):31–45. DOI: 10.1093/neuonc/noz153
29. Breivik C.N., Nilsen R.M., Myrseth E. et al. Conservative management or gamma knife radiosurgery for vestibular schwannoma: tumor growth, symptoms, and quality of life. *Neurosurgery* 2013;73(1):48–56; discussion 56–7. DOI: 10.1227/01.neu.0000429862.50018.b9
30. Régis J., Carron R., Park M.C. et al. Wait-and-see strategy compared with proactive Gamma Knife surgery in patients with intracranial vestibular schwannomas. *J Neurosurg* 2010;113 Suppl:105–11. DOI: 10.3171/2010.8.gks101058
31. Han J.H., Kim D.G., Chung H.-T. et al. Hearing outcomes after stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas: mechanism of hearing loss and how to preserve hearing. *Adv Tech Stand Neurosurg* 2016;43:3–36. DOI: 10.1007/978-3-319-21359-0_1
32. Baschnagel A.M., Chen P.Y., Bojrab D. et al. Hearing preservation in patients with vestibular schwannoma treated with Gamma Knife surgery. *J Neurosurg* 2013;118(3):571–8. DOI: 10.3171/2012.10.JNS12880
33. Hasegawa T., Kida Y., Kato T. et al. Factors associated with hearing preservation after Gamma Knife surgery for vestibular schwannomas in patients who retain serviceable hearing. *J Neurosurg* 2011;115(6):1078–86. DOI: 10.3171/2011.7.JNS11749
34. Kano H., Kondziolka D., Khan A. et al. Predictors of hearing preservation after stereotactic radiosurgery for acoustic neuroma. *J Neurosurg* 2009;111(4):863–73. DOI: 10.3171/2008.12.JNS08611
35. Hasegawa T., Kida Y., Kato T. et al. Long-term safety and efficacy of stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas: evaluation of 440 patients more than 10 years after treatment with Gamma Knife surgery. *J Neurosurg* 2013;118(3):557–65. DOI: 10.3171/2012.10.JNS12523
36. Sughrue M.E., Kaur R., Rutkowski M.J. et al. A critical evaluation of vestibular schwannoma surgery for patients younger than 40 years of age. *Neurosurgery* 2010;67(6):1646–53; discussion 1653–4. DOI: 10.1227/NEU.0b013e3181f8d3d3
37. Chung W.-Y., Liu K.-D., Shiau C.-Y. et al. Gamma knife surgery for vestibular schwannoma: 10-year experience of 195 cases. *J Neurosurg* 2005;102 Suppl:87–96. PMID: 15662787.
38. Lunsford L.D., Niranjan A., Flickinger J.C. et al. Radiosurgery of vestibular schwannomas: summary of experience in 829 cases. *J Neurosurg* 2005;102 Suppl:195–9.
39. Régis J., Carron R., Delsanti C. et al. Radiosurgery for vestibular schwannomas. *Neurosurg Clin N Am* 2013;24(4):521–30. DOI: 10.1016/j.nec.2013.06.002
40. Watanabe S., Yamamoto M., Kawabe T. et al. Stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas: average 10-year follow-up results focusing on long-term hearing preservation. *J Neurosurg* 2016;125(Suppl 1):64–72. DOI: 10.3171/2016.7.GKS161494
41. Anselmo P., Casale M., Arcidiacono F. et al. Twelve-year results of LINAC-based radiosurgery for vestibular schwannomas. *Strahlenther Onkol* 2020;196(1):40–7. DOI: 10.1007/s00066-019-01498-7
42. Carlson M.L., Vivas E.X., McCracken D.J. et al. Congress of Neurological Surgeons Systematic Review and Evidence-Based Guidelines on Hearing Preservation Outcomes in Patients with Sporadic Vestibular Schwannomas. *Neurosurgery* 2018;82(2):E35–9. DOI: 10.1093/neuros/nyx511
43. MacDonald B.V., Ren Y., Shahrvini B. et al. Delayed facial nerve palsy following resection of vestibular schwannoma: clinical and surgical characteristics. *Otol Neurotol* 2022;43(2):244–50. DOI: 10.1097/MAO.0000000000003392
44. Perkins E.L., Manzoor N.F., Totten D.J. et al. The influence of extent of resection and tumor morphology on facial nerve outcomes following vestibular schwannoma surgery. *Otol Neurotol* 2021;42(9):e1346–52. DOI: 10.1097/MAO.0000000000003253
45. Tawfik K.O., Alexander T.H., Saliba J. et al. Predicting long-term facial nerve outcomes after resection of vestibular schwannoma. *Otol Neurotol* 2020;41(10):e1328–32. DOI: 10.1097/MAO.0000000000002883
46. Nakatomi H., Jacob J.T., Carlson M.L. et al. Long-term risk of recurrence and regrowth after gross-total and subtotal resection of sporadic vestibular schwannoma. *J Neurosurg* 2017;1–7. DOI: 10.3171/2016.11.JNS16498
47. Iwai Y., Ishibashi K., Watanabe Y. et al. Functional preservation after planned partial resection followed by Gamma Knife radiosurgery for large vestibular schwannoma. *World Neurosurg* 2015;84(2):292–300. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.03.012
48. Chung W.-Y., Pan D. H.-C., Lee C.-C. et al. Large vestibular schwannomas treated by Gamma Knife surgery: long-term

- outcomes. *J Neurosurg* 2010;113 Suppl:112–21. DOI: 10.3171/2010.8.ghs10954
49. Van de Langenberg R., Hanssens P.E.J., Verheul J.B. et al. Management of large vestibular schwannoma. Part II. Primary Gamma Knife surgery: radiological and clinical aspect. *J Neurosurg* 2011;115(5):885–93. DOI: 10.3171/2011.6.JNS101963
50. Bailo M., Boari N., Franzin A. et al. Gamma Knife radiosurgery as primary treatment for large vestibular schwannomas: clinical results at long-term follow-up in a series of 59 patients. *World Neurosurg* 2016;95:487–501. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.07.117
51. Lefranc M., Da Roz L.M., Balossier A. et al. Place of Gamma Knife stereotactic radiosurgery in grade 4 vestibular schwannoma based on case series of 86 patients with long-term follow-up. *World Neurosurg* 2018;114:e1192–8. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.03.175
52. Watanabe S., Yamamoto M., Kawabe T. et al. Long-term follow-up results of stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas larger than 8 cc. *Acta Neurochirurg* 2019;161(7):1457–65. DOI: 10.1007/s00701-019-03951-z
53. Stastna D., Urgosik D., Chytka T., Liscak R. Large vestibular schwannomas: long-term outcomes after stereotactic radiosurgery. *Neuro Endocrinol Lett* 2021;41(6):329–38.
54. Iwai Y., Yamanaka K., Yamagata K., Yasui T. Surgery after radiosurgery for acoustic neuromas: surgical strategy and histological findings. *Neurosurgery* 2007;60(2 Suppl 1):75–82; discussion 82. DOI: 10.1227/01.NEU.0000249251.78794.45
55. Troude L., Boucekine M., Balossier A. et al. Is salvage surgery for large vestibular schwannomas after failed gamma knife radiosurgery more challenging? *Neurosurg Rev* 2022;45(1):751–61. DOI: 10.1007/s10143-021-01604-3
56. Whitmeyer M., Brahimaj B.C., Beer-Furlan A. et al. Resection of vestibular schwannomas after stereotactic radiosurgery: a systematic review. *J Neurosurg* 2020;135(3):881–9. DOI: 10.3171/2020.7.JNS2044
57. Hadjipanayis C.G., Carlson M.L., Link M.J. et al. Congress of Neurological Surgeons Systematic Review and Evidence-Based Guidelines on Surgical Resection for the Treatment of Patients with Vestibular Schwannomas. *Neurosurgery* 2018;82(2):E40–3. DOI: 10.1093/neuros/nyx512
58. Li L.-F., Yu C.-P., Tsang A.C.-O. et al. Near-complete regression 19 years after Gamma Knife radiosurgery of vestibular schwannoma with massive pseudoprogression: case report. *J Neurosurg* 2020;134(5):1455–8. DOI: 10.3171/2020.3.JNS20389
59. Régis J., Pellet W., Delsanti C. et al. Functional outcome after gamma knife surgery or microsurgery for vestibular schwannomas. *J Neurosurg* 2002;97(5):1091–100. DOI: 10.3171/jns.2002.97.5.1091
60. Berkowitz O., Han Y.-Y., Talbott E.O. et al. Gamma Knife radiosurgery for vestibular schwannomas and quality of life evaluation. *Stereotact Funct Neurosurg* 2017;95(3):166–73. DOI: 10.1159/000472156
61. Caruso J.P., Moosa S., Fezeu F. et al. A cost comparative study of Gamma Knife radiosurgery versus open surgery for intracranial pathology. *J Clin Neurosci* 2015;22(1):184–8. DOI: 10.1016/j.jocn.2014.08.012

Вклад авторов

С.Р. Ильялов: обзор литературы по теме статьи, написание текста статьи, подготовка иллюстративного материала и таблиц;

А.В. Голанов: общее руководство работой;

С.М. Банов: обсуждение, редактирование текста статьи.

Authors' contribution

S.R. Ilyalov: a review of the literature on the topic of the article, article writing, preparation of illustrative material and tables;

A.V. Golanov: general supervision;

S.M. Banov: discussion, article editing.

ORCID авторов / ORCID of authors'

С.Р. Ильялов / S.R. Ilyalov: <https://orcid.org/0000-0002-1572-5798>

А.В. Голанов / A.V. Golanov: <https://orcid.org/0000-0002-0976-4547>

С.М. Банов / S.M. Banov: <https://orcid.org/0000-0002-6510-7883>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 09.01.2023. **Принята к публикации:** 24.10.2023.

Article received: 09.01.2023. **Accepted for publication:** 24.01.2023.