

J. A. Bertelli, MD, PhD, M. F. Ghizoni, MD

## SURGICAL RECONSTRUCTION OF BRACHIAL PLEXUS PALSY IN ADULTS

*Center of Biological and Health Sciences, University of Southern Santa Catarina (Unisul). Tubarão, SC, Brazil*

© Bertelli J. A., Ghizoni M. F., MD

We review our experience treating 358 adult patients with supraclavicular brachial plexus injuries over a 7-year period at the University of Southern Santa Catarina, in Brazil. Patients were categorized into 8 groups, according to functional deficits and roots injured: C5–C6, C5–C7, C5–C8 (T1 Hand), C5–T1 (T2 Hand), C8–T1, C7–T1, C6–T1, and total palsy. To restore function, nerve grafts, nerve transfers, and tendon and muscle transfers were employed. Patients with either upper- or lower-type partial injuries experienced considerable functional return. In total palsies, if a root was available for grafting, 90 % of patients had elbow flexion restored, whereas this rate dropped to 50 % if no roots were grafted and only nerve transfers performed. Pain resolution should be the first priority, and root exploration and grafting helped to decrease or eliminate pain complaints within a short time of surgery.

**Key words:** *brachial plexus repair, brachial plexus palsy, nerve grafting, nerve transfer.*

УДК 616.833.34-009.11-089.844:001.894

Brachial plexus lesions are a tragic condition that usually affects young adults, with significant socioeconomic implications. Only four decades ago, brachial plexus surgery still was approached with considerable pessimism. As recently as the 1996 International Society for Orthopaedic Surgery and Traumatology (SICOT) in Paris, it was concluded that surgical repair of these lesions was almost impossible and, even when performed, did not guarantee a useful result<sup>1</sup>. However, the ongoing increase in the number of civilian brachial plexus lesions due to motorcycle accidents has, without a doubt, promoted interest in this field, and recent years have witnessed tremendous progress in surgical techniques for brachial plexus repair. At our institution, between January 2002 and December 2008, 338 patients suffering from supraclavicular brachial plexus palsy underwent surgical repair. In the present report, we review our results and current approach to treatment.

### DIAGNOSING BRACHIAL PLEXUS PALSIES

In half of our patients, electrophysiological studies were available preoperatively. In 102 patients, magnetic resonance imaging (MRI) of the brachial plexus, including the spinal cord, was obtained, whereas computed tomography (CT myelography) was performed in all cases. The clinical diagnosis of root involvement was correct in 85 % of our patients. Extremely reliable tests or signs were a supraclavicular Tinel's sign to indicate a graftable root, and a Horner's sign to indicate lower root avulsion<sup>2</sup>.

Electrophysiological studies did not contribute, in any way, to identifying indications for surgery or to surgical planning. Consequently, we no longer request electrophysiological studies preoperatively. MRI was useful merely to document avulsion of the lower roots. However, Horner's sign was 96 % predictive of lower root avulsion<sup>2</sup>. MRI was not helpful in identifying a graftable root at the C5 or C6 level, because of poor visualization of the intradural portion of these roots. This is the main reason for interest in CT myelography: confirming that a root stump located in the supraclavicular region during dissection is in continuity with the spinal cord and, thereby, eligible for grafting.

### TIMING OF SURGERY

Patients with total palsy of the brachial plexus following a traffic accident have almost no chance of spontaneous recovery. In our series of patients with total palsy, spontaneous recovery was not observed. This is different for partial injuries, in which some spontaneous improvement might occur. We prefer to operate on such patients after the third month but before the sixth month after injury. Some of our patients were operated upon after the seventh month with good results. However, more than 9 months after trauma, our results declined dramatically.

In partial injuries, we observed some good results even 10 months after surgery when distal nerve transfers were employed. This was not observed in patients with total palsy in whom nerve grafts were used 10 months or more following the accident<sup>3</sup>.

# **DEFINITION OF PARALYSIS ACCORDING TO ROOT INVOLVEMENT**

## *C5–C6 ROOT INJURY*

This group consisted of those patients with palsy involving shoulder abduction and external rotation, elbow flexion, and forearm supination. The coracobrachialis remained innervated in all patients. The flexor carpi radialis and pronator teres functioned, but were weak. Wrist flexion was largely preserved, because the palmaris longus and the flexor carpi ulnaris were unaffected. The upper head of the pectoralis major was paralyzed or weak; but, during resisted adduction, there was no apparent atrophy of the muscle. Hand grasp strength was 68 % that of the normal side, and pinch strength was 80 % of normal. Wrist extension strength was 55 % that of the normal side, while elbow extension was 66 % the normal value (Table 1). The hand exhibited normal sensation. One zone of lost protective sensation was observed along the lateral aspect of the forearm extending towards but not necessarily reaching the thumb. A second zone was noted over the deltoid chevron (Fig. 1).

## *C5–C7 ROOT INJURY*

The clinical picture with this lesion was similar to what we observed in the C5–C6 palsy group. Wrist, finger and elbow extension were preserved, but there tended to be a greater loss of strength than in the C5–C6 patients (Table 1). The upper portion of the pectoralis was atrophied. The latissimusdorsi was paralyzed in half of the patients. The flexor carpi radialis and pronator teres were paralyzed. There was an extended sensory deficit, but no loss of protective sensation in the fingers. Hand grasp strength was just 39 % that observed in the normal contralateral limb, whereas pinch strength was 60 % the normal value. Wrist extension and triceps strength were 43 % and 41 % that of the normal side, respectively. Relative to the C5–C6 group, grasp, pinch, triceps and wrist extension strength were significantly decreased ( $p < 0,05$ ). There was a reduction in sensation in all fingers, but especially in the thumb. However, protective sensation was preserved throughout the entire hand. There was a continuous longitudinal area

**Grasping, pinch and wrist and elbow extension strength  
in the different group of palsies**

Type of palsy	Grasping (Kg)	Pinch (Kg)	Wrist extension (Kg)	Elbow extension (Kg)
C5–C6	26,3 (95 % CI, 22,9–229,7)	8 (95 % CI, 7,1–8,8)	7,1 (95 % CI, 6,1–8,1)	7,8 (95 % CI, 6–9,5)
C5–C7	14,7 (95 % CI, 8,7–20,7)	6 (95 % CI, 4,8–7,1)	5,6 (95 % CI, 5,1–6,2)	4,8 (95 % CI, 4,2–5,4)
C5–C8	13 (95 % CI, 9,7–16,3)	4 (95 % CI, 2,8–5,3)	paralyzed or extremely weak	paralyzed
C5–T1 (postfixed)	extremely weak	extremely weak	paralyzed or extremely weak	paralyzed
Normal	38 (95 % CI, 36,6–39,4)	10,1 (95 % CI, 9,2–10,9)	13 (95 % CI, 11,4–14,5)	11,8 (95 % CI, 10,4–13,2)

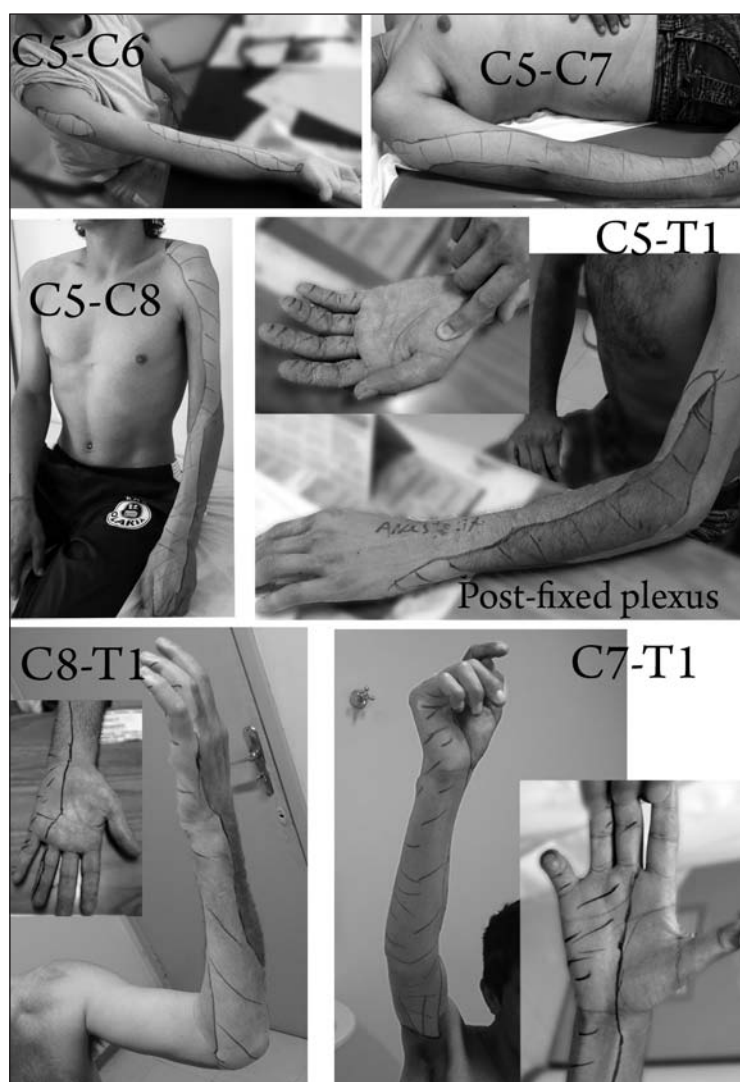
Strength with grasping, pinching and wrist and elbow extension in the different palsy groups and in the normal contralateral limb — In all groups, strength was significantly decreased relative to the normal side ( $p < 0,005$ ). Grasp strengths were 70 %, 40 % and 36 % that of the normal limb in those with C5–C6, C5–C7 and C5–C8 injuries, respectively. All inter-group differences were statistically significant; however, only the difference between the C5–C6 and C5–C7 groups can be considered clinically relevant. Pinch strengths were 80 %, 60 % and 40 % of normal with C5–C6, C5–C7 and C5–C8 lesions, respectively; these differences all were significant, both statistically ( $p < 0,05$ ) and clinically. Wrist extension strengths were 55 %, 43 % and 0 % in the C5–C6, C5–C7 and C5–C8 palsy groups, respectively; and corresponding elbow extension strengths were 66 %, 41 % and 0 %. These differences in wrist and elbow extension strength all were statistically significant ( $p < 0,05$ ).

of anesthesia along the lateral aspect of the forearm and arm, and over the deltoid chevron (Fig. 1).

## *C5–C8 ROOT INJURY (T1 HAND)*

In addition to the shoulder and elbow flexion palsy, the teres major, latissimusdorsi and triceps all were paralyzed. The pectoralis major was paralyzed. Wrist extension was paralyzed in all patients. However, some patients could extend their wrist with the help of thumb and finger extensors. In these cases, wrist extension strength did not exceed 1 kg. In a few patients, only extension of the thumb and index finger was preserved. The triceps, flexor carpi radialis, pronator teres and flexor carpi ulnaris were paralyzed. Wrist flexion was possible, thanks to the

Table 1



**Figure 1. Zones of lost protective sensation with the different types of brachial plexus palsy. Mapping was performed following assessments using Semmes-Weinstein monofilaments. In those with a C5–C6 injury, hand sensation was totally preserved. In the C5–C7 injury group, hand sensation was decreased, but still was within the normal range. A longitudinal area of absent protective sensation was present on the lateral aspect of the forearm and arm. In the C5–C8 palsy group, there was a similar longitudinal area along the lateral side of the arm and forearm, associated with no protective sensation. The dorsal side of the hand also was now markedly affected. On the palmar aspect of the hand, sensation decreased to a variable degree. Almost half of the patients had normal sensation, and the remaining half experienced thumb anesthesia. In those with a C5–T1 lesion with post-fixation of the plexus, only a small zone was observed in which there was preserved sensation over the medial side of the forearm. Hand sensation was markedly reduced. The thumb was anesthetized, but protective sensation was demonstrated in the long fingers (inset). In the C8–T1 palsy group, a loss of protective sensation was evident on the medial side of the forearm and in the ulnar fingers. In the C7–T1 injury group, the inner aspect of the arm also was affected, together with additional involvement of the long finger**

palmarislongus. Pronation was possible because the pronator quadratus functioned. Hand grasp strength was 36 % that of the normal side, and pinch strength 40 % of normal (Table 1). In comparison with the C5–C6±C7 groups, grasping and pinch strength were significantly reduced ( $p < 0,05$ ). A mean 20 % reduction in pinch strength was observed, making this weakness more pronounced than the loss of grasp strength; the decline in grasp strength, although significant, was only 3 %. There was a continuous longitudinal zone of lost protective sensation over the lateral forearm, lower arm and deltoid chevron, as in the previous group. However, this region was wider, affecting 1/3 of the limb circumference. Contrary to the previous group, the dorsal aspect of the hand, including the dorsal ulnar side, now was affected. With respect to the fingers, there was no particular pattern of sensory disturbance. For instance, a few patients presented with thumb anesthesia, but others exhibited normal sensation in all fingers. In no instance was complete anesthesia of all fingers observed (Fig. 1). Horner's sign was absent.

#### *C5–T1 ROOT INJURY WITH PARTIALLY PRESERVED FINGER FLEXION AND HORNER'S SIGN (T2 HAND)*

In these patients, the shoulder was completely paralyzed. Adduction was impossible, because the pectoralis major was totally paralyzed in all patients. Finger and wrist extension were paralyzed. Wrist flexion was weak, but preserved in half of the patients because the palmarislongus remained functional. Finger flexion was noted in all cases, but it was incomplete in excursion, and in no hand were all fingers functional. Grasping and pinch strength were not measurable due to extreme weakness. Thumb anesthesia was frequent. The dorsal aspect of the hand was completely anesthetized. The lateral longitudinal bundle, over the forearm and arm, was wider, now comprising 2/3 of the limb circumference (Fig. 1). There was a zone of normal sensation over the ulnar border. It is our



impression that these patients had either an undetected partial root injury of T1, though CT tomomyeloscans confirmed avulsion; or, more likely, post-fixation of the brachial plexus by T2. We now call this cohort of patients the T2 hand group.

#### C8-T1 ROOT INJURY

Shoulder and elbow flexion were normal (Table 2). Wrist and finger extension were preserved. The flexor carpi radialis was preserved, but the flexor carpi ulnaris and palmaris longus were paralyzed. The pronator teres was preserved. Intrinsic muscles of the hand were partially preserved. The flexor pollicis longus was paralyzed. Strength of wrist extension was 73 % that of the normal wrist. Elbow flexion was equal to the contralateral side. Sensory disturbances compromised the ulnar aspect of the hand and forearm. Horner's sign was present in all cases, and CT myeloscans indicated avulsion of both C8 and T1 in all patients.

#### C7-T1 ROOT INJURY

These patients with more extensive palsy recovered spontaneously in the territory of the upper roots of the brachial plexus. Shoulder and elbow range of motion were normal. However, strength was markedly reduced ( $p < 0,05$ ) relative to the patient's normal side, and relative to the affected limb in the C8-T1 palsy group (Table 2). For instance, elbow flexion strength was 61 % and triceps strength just 25 % that of the normal side. Wrist extension was weak, corresponding to 46 % that of the normal side. When patients extended their wrist, radial deviation occurred. Both the extensor carpi radialis brevis and longus functioned, but the extensor carpi ulnaris was paralyzed. Sensory disturbance was present along the ulnar aspect of the hand, forearm and arm. As opposed to the C8-T1 group, decreased sensation also was apparent in the third finger. Thumb sensation was normal.

#### C6-T1 ROOT INJURY

We observed 4 patients with paralysis of finger flexion/extension, accompanied by weak wrist extensors and triceps paralysis. Triceps paralysis and

Table 2

**Values of strength for elbow flexion/extension and wrist extension in C8-T1 and C7-T1 palsies**

Type of palsy	Elbow Flexion/Kg	Elbow Extension/Kg	Wrist Extension/Kg
C8-T1	16,2 (95 % CI, 13,5-18,9)	12,5 (95 % CI, 7,9 17)	9,5 (95 % CI, 6,7-12,2)
C7-T1	11,6 (95 % CI, 10,6-12,6)	3 (95 % CI, 1,7-4,2)	6 (95 % CI, 3,6-8,3)
Normal	19 (17,2-20,7)	11,8 (10,4-13,2)	13 (95 % CI, 11,4-14,5)

Table 2: Values of strength for elbow flexion/extension and wrist extension in C8-T1 and C7-T1 palsies. Strength in C7-T1 injuries was significantly ( $p < 0,05$ ) reduced relative to the normal, contralateral limb. The rates for the C8-T1 injury group did not differ from normal values. In the C7-T1 group, elbow and wrist extension strengths were 25 % and 46 % those of the normal side, respectively.

weak wrist extension were the main differences in this versus the previous group. Shoulder motion and elbow flexion were almost normal. Surgery was not performed for brachial plexus exploration; hence, the status of the roots was not inspected directly. On CT myelogram, avulsion of C7-T1 was confirmed in all cases. The nature of the lesion affecting C6 was not clear. Most likely, there was partial injury with spontaneous recovery. Of importance is that, in this group of patients, elbow extension reconstruction is mandatory.

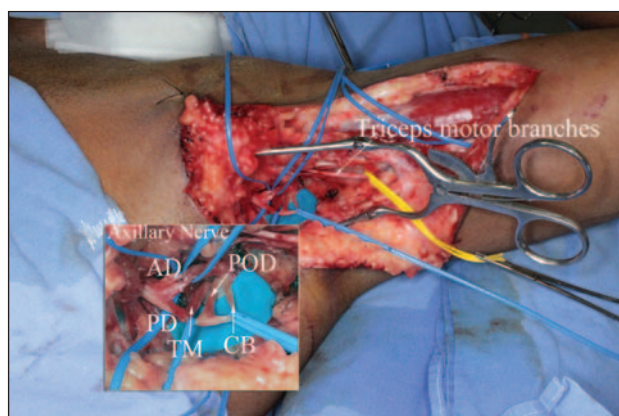
#### TOTAL PALSY

In these patients, the clinical picture was a flail limb. All patients presented with a Horner's sign. The sensory deficit included the entire limb, except for the inner aspect of the arm.

#### SURGICAL TREATMENT

##### UPPER TYPE PALSIES (C5-C6±C7)

In these patients, elbow flexion and shoulder abduction/external rotation are the missing functions that require reconstruction. When roots are avulsed, which occurred in only 22 % of our patients, reconstruction is achieved by triple neurotization: (1) the accessory nerve is transferred to the suprascapular nerve; (2) the triceps long head motor branch is transferred to the anterior division of the axillary nerve and to the teres minor motor branch; and (3) fascicles of the ulnar nerve are transferred



**Figure 2.** Intra-operative view of a left axillary approach to neurotize the anterior division (AD) of the axillary nerve and the teres minor motor branch. Through this same approach, ulnar nerve fascicles are concomitantly transferred to the biceps motor branch. (PD) posterior division of the axillary nerve and its branches: (TM) teres minor motor branch, (POD) branch to the posterior deltoid muscle, and (CB), the upper arm lateral cutaneous nerve

to the biceps motor branch<sup>4</sup>. We now perform triceps-to-axillary nerve transfers using an axillary approach (Fig. 2). Comparing results for patients with root avulsions treated by triple neurotization exclusively versus those who had roots grafted to the upper trunk plus triple neurotization, we observed better results for the combined root grafting plus nerve transfer procedure<sup>5</sup>. We believe that root grafting was helpful for reinnervation of antagonist muscles or shoulder stabilizers, which were not addressed by the nerve transfer intervention. For instance: when elbow flexion is resisted, pectoralis major contraction is easily perceived, even though the pectoralis major is not an elbow flexor. The pectoralis major contracts to stabilize the shoulder joint. Also, we observed that patients with C5 and C6 root grafting in whom the suprascapular nerve was transferred to the XI<sup>th</sup> cranial nerve and fascicles of the ulnar nerve were transferred to the biceps motor nerve, but who had no triceps transfers to the axillary nerve, exhibited less external rotation recovery than patients who underwent triple nerve transfers. In this group of patients, external rotation is the most difficult motion to restore. Therefore, contrary to what other surgeons have proposed,<sup>6</sup> we believe that not only the anterior branch of the axillary nerve, but also the teres minor motor branch should be consistently neurotized by triceps nerve branches. Hence, it is our policy now that, even when we have two graftable roots (C5+C6), we graft the roots to the upper trunk and perform a triple nerve transfer.

Our overall results for reconstruction of upper-type lesions of the brachial plexus are encouraging. Both full abduction and full external rotation of the shoulder were restored in 15 % among those in the C5 and C6 nerve root avulsion group reconstructed by triple nerve transfer, in 67 % of the patients who received C5 nerve root grafting plus a triple nerve transfer, and in 33 % of patients who received a C5+C6 nerve root graft group, plus transfer of cranial nerve XI to the suprascapular nerve and ulnar nerve fascicles to the biceps motor branch. The average percentages of elbow flexion strength recovery, relative to the normal, contralateral side, were 27 %, 43 % and 59 % for the C5-C6 nerve root avulsion, C5 nerve root graft, and C5+C6 nerve root graft groups, respectively. Hence, it seems that combining grafted roots with distal nerve transfers also improves elbow flexion strength.

#### T1 HAND

When the C5 root was available for grafting, it was grafted either to the anterior or posterior division of the upper trunk. To date, we have not observed clear differences in recovery of motion attaching nerve grafts to the anterior versus posterior division of the upper trunk, but this may be because of the few patients like this that we have had. In the «T1 hand» group of patients, elbow extension has required reconstruction. In a few patients, we have used the median nerve to neurotize the biceps motor branch, while ulnar nerve fascicles were used to neurotize the triceps long head motor branch. None of these patients recovered satisfactory elbow flexion/extension. Consequently, we have abandoned the procedure of triceps reinnervation by ulnar nerve fascicles.

In another group of 4 patients, we tried intercostal nerve transfers to the triceps long head motor branch, with fruitless results, either because of poor reinnervation or poor motor control. Our current approach is to transfer the levator scapulae motor branch to the triceps long head motor branch, aided by a sural nerve graft. Recovery of elbow extension is not strong, but is fully under voluntary control, and control over elbow flexion-extension is important to stabilize the elbow when tendon transfers are needed for thumb and finger extension reconstruction. In this regard, we should highlight an important point. If the motor fascicles of the flexor carpi ulnaris (FCU) are transferred for elbow flexion through biceps reinnervation, and then the FCU is transferred to the extensor

digitorumcommunis (EDC) and extensor pollicislongus (EPL) for reconstruction of a radial nerve palsy, results will be very poor. When the patient extends the thumb and fingers by activating the transferred FCU, the elbow flexes concomitantly. In the T1 hand, ulnar nerve fascicles to the intrinsic muscles of the hand should be used for finger flexors instead of fascicles for the FCU, as originally proposed by Oberlin et al.<sup>7</sup>. Transferring fascicles of the ulnar nerve to the intrinsic muscles of the hand does not downgrade hand function<sup>5</sup>.

Another interesting observation we have made is that, in general in the T1 hand, intra-operative electrical stimulation of the median nerve produces stronger finger motion than stimulation of the ulnar nerve. Hence, in the T1 hand, we always dissect both the ulnar and median nerves, stimulate them with a nerve locator, and then use the «stronger» nerve as a donor of fascicles for biceps reinnervation.

#### TOTAL PALSY

##### A) With graft-able roots

In 87 % of our patients with total palsy, a graft-able root was available<sup>2</sup>. In these patients, the accessory nerve is always transferred to the suprascapular nerve, which yields an average of 57° of shoulder abduction. When two roots were available for grafting, typically C5+C6, C5 was grafted to the anterior division of the upper trunk, and C6 was grafted to the posterior division. Sural grafts were less than 10 cm long. After surgery, forearm muscle reinnervation was not useful. Some patients recovered wrist flexion and some finger flexion, albeit weak. We consider M3-level finger flexion useless, because our patients did not use their hand for active grasping. Elbow flexion/extension could not be restored simultaneously. Elbow flexion was M3 or more in 85 % of these patients. Elbow flexion always was accompanied by pectoralis major contraction.<sup>8</sup>

In a second group of patients, the C5 root was grafted more distally, either to the lateral cord or to the musculocutaneous nerve. When available, the C6 root was grafted to the radial nerve. The pectoralis major was reinnervated by branches to the platysma, whereas the triceps long head was reinnervated by branches to the levator scapulae nerve. Elbow flexion scoring M3 or better was identified in 91 % of patients, a score slightly better than when short grafts were connected to the upper trunk<sup>8,9</sup>. These findings might result from double lesions of the musculocutaneous nerve, which occurred in

18 % of our cases<sup>9</sup> and would have been passed undetected when only the supraclavicular region of the brachial plexus was explored<sup>8</sup>. Transferring the levator scapulae motor branch to the triceps long head restored elbow extension predictably, albeit weakly. Using the C6 root to reconstruct the radial nerve largely was unpredictable, both with respect to elbow extension and wrist and finger extension. Though partially successful, definitive conclusions regarding the transfer of the platysma motor nerve to the medial pectoralis nerve cannot be drawn.

In a third group of patients, we grafted the C5 root to the lateral cord using a vascularized ulnar nerve graft<sup>10</sup>. Results were poor. In our opinion, the reasons for failure are related to the length of our grafts allied with the unfavorable internal morphology of a trunk graft. It is possible that regeneration in long, vascularized trunk grafts is worse than what occurs after the same repair using a sural nerve graft. We have since abandoned the use of vascularized ulnar nerve grafts. In total palsies, our current trend is to graft roots and donor nerves directly to recipient nerves using longer grafts.

In total palsies of the brachial plexus, it is imperative to graft viable roots. This offers not only a good potential for recovery, but also treats brachial plexus pain. In total lesions, 84 % of the patients suffered from pain and almost 84 % have a graft-able root<sup>2,11</sup>. Pain subsided in half of these patients in the days after grafting. We have postulated that pain in brachial plexus injuries stems from ruptured rather than avulsed roots<sup>12</sup>, challenging current concepts which blame deafferentation as the origin of pain<sup>13</sup>. In patients who have been grafted but pain persists, we have attributed pain to the growth of axons, because this process is associated with the large production of neurotrophic factors that produce pain<sup>14,15</sup>.

##### B) Without graft-able roots

In these patients, not only are there no roots available for grafting, but donor nerves for transfer — like the accessory and phrenic nerve — may not be available either. After surgery, only half of these patients achieved recovery of elbow flexion when we used the phrenic nerve, contralateral C7 or hypoglossal nerve. For suprascapular nerve neurotization, we used the accessory nerve, contralateral C7, hypoglossal nerve, cervical plexus and platysma motor branch. Shoulder abduction was restored in half the patients, to an average of 28°. Results for reconstruction of total palsies without a graft-able root clearly were worse than when a root was eligible for grafting. This suggests that root grafting is better than extraplexal nerve transfers for elbow





**Figure 3. Intra-operative view of a pulley dermodesis for correction of metacarpophalangeal hyperextension in a patient with a lower type palsy of the right brachial plexus. After resection of a cutaneous ellipse centered on the distal palmar crease, the A1 pulley was sutured to the palmar aponeurosis and proximal dermis**

flexion reconstruction. Extension of the trauma also may have affected donor nerves for transfer. For instance, results for shoulder abduction following cranial nerve XI to suprascapular nerve transfers were poor, relative to when a root was available for grafting. This might reflect not only an associated lesion of the accessory nerve, but also an extended lesion affecting the suprascapular nerve.

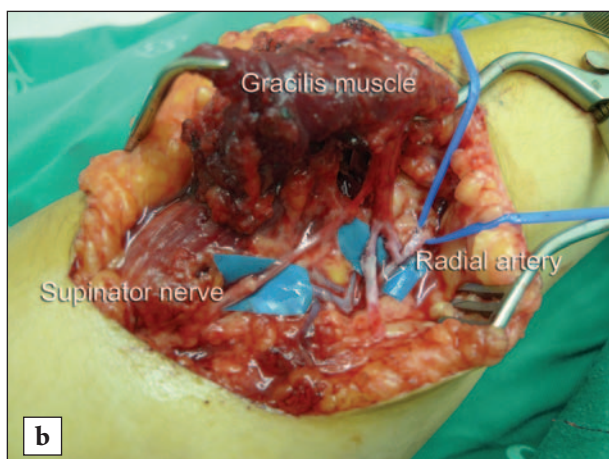
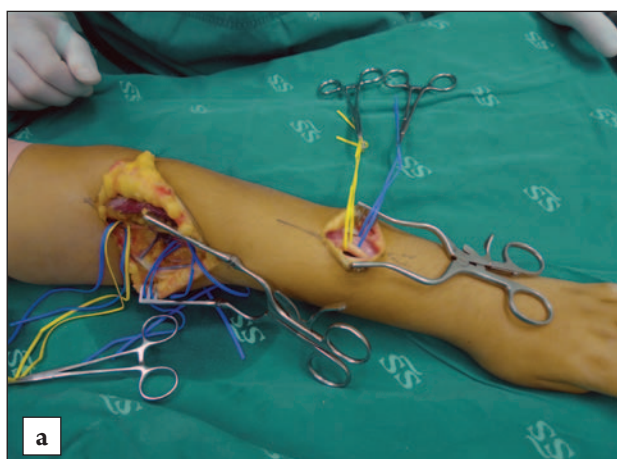
### LOWER TYPE PALSIES

In all patients, thumb and finger flexion was reconstructed by transferring the brachialis muscle to the flexor digitorum profundus and flexor pollicis longus<sup>15</sup>. Tension was adjusted according to each patient's needs. Restoration of at least 2 kg of grasping strength allowed our patients to use their hand during daily activities. Some patients recovered up to 8 kg of strength, because more tension was applied during the transfer. This augments the power of grasping when the elbow is extended as a consequence of atenodesis effect. In addition, strong wrist extension is helpful to increase the range of motion and power of finger flexion. However, when more tension is applied for the brachialis transfer, hand

span may be jeopardized. It is particularly important to reconstruct thumb motion, more than that of the fingers. In two patients, besides a brachialis transfer, during a second surgery we transferred the brachioradialis to the flexor digitorum superficialis and flexor pollicis longus. These two patients experienced a 50 % improvement in grasp strength, with preserved hand span.

When paralyzed, elbow extension was reconstructed by transferring the posterior deltoid to the triceps using a fascia lata graft. All 4 patients recovered enough stability of the elbow to allow us to proceed to tendon transfers for hand reconstruction. Only one patient recovered M4 elbow extension, with the remaining scoring M3. If surgery is performed within 6 months of injury, we now prefer to reconstruct elbow extension by transferring either the motor branch of the posterior deltoid or the motor branch of the teres minor, as we have done for tetraplegics<sup>17,18</sup>.

Finger extension, when absent, was successfully reconstructed by transferring the supinator motor branches to the posterior interosseous nerve<sup>19,20</sup>. Tenodesis of the EDC and EPL produced poor results. Poor outcomes also resulted from transferring the extensor carpi radialis longus or brachioradialis



**Figure 4.** A — Intra-operative view of a dissected forearm from a patient with longstanding lower type injury of the brachial plexus. Reconstruction of thumb and finger extension was reconstructed by a free gracilis muscle innervated by the supinator nerve. B — Note the gracilis muscle. The gracilis artery was coaptated end-to-side to the radial artery, whereas the one of gracilis vein was anastomosed end-to-end with a comitant radial artery vein. The motor branch of the gracilis muscle was connected with the supinator nerve. C — Results 12 months after surgery. This patient is capable to extend the thumb and fingers. Note the bulky of the transplanted gracilis muscle (arrow)

to the EDC. In chronic cases, because of poor results of nerve repair and tendon transfers, our strategy is no reconstruct thumb and finger extension by a free gracilis muscle reinnervated by the supinator motor nerve (Fig 3). When radial wrist extensors and brachioradialis muscle is functioning the supinator nerve is always preserved and available as donor for transfer<sup>20</sup>.

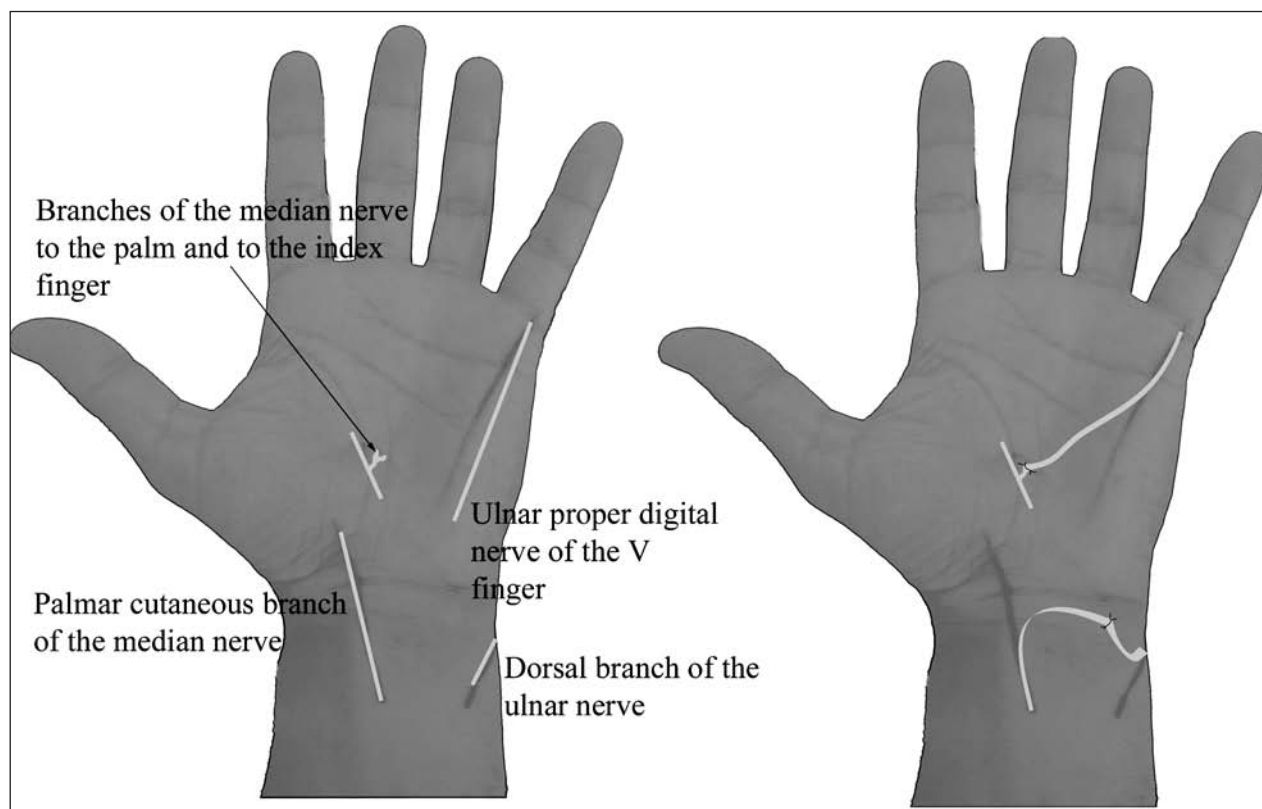
Thumb stabilization by tenodesis of the abductor pollicis longus on the dorsal side of the radius or to the FCU produced limited improvement. In contrast, excellent results for thumb stabilization and spanning occurred after transferring the supinator motor branch to the posterior interosseous nerve<sup>20</sup>. Good results also were observed in two patients with chronic lesions who had their supinator muscle transferred to the extensor pollicis brevis, aided by a tendon graft<sup>21</sup>. When needed, stabilization of the thumb interphalangeal joint was achieved by transferring half of the flexor pollicis longus to the extensor pollicis longus<sup>22</sup>.

Intrinsic muscle function reconstruction was attempted by removing an ellipse of skin over the distal palmar crease and suturing the proximal dermis and

palmar aponeurosis to the A1 pulley (Fig 4). If good function of the extrinsic extensors of the fingers was preserved, or reconstructed by nerve transfers, good results were observed. Otherwise, the results were poor. In patients with poor results, we have tried to improve intrinsic function by transferring the extensor carpi radialis brevis, prolonged by four-tailed tendon grafts, to the interosseous tendon, as proposed by Brand<sup>23</sup>. There was no improvement in proximal interphalangeal joint extension. When the extensor indicis proprius was preserved, it was successfully transferred to reconstruct thumb abduction.

Sensation on the ulnar side of the hand was reconstructed either by transferring the palmar branch of the median nerve to the dorsal branch of the ulnar nerve, or by connecting the proper digital ulnar nerve of the little finger with fascicles of the median nerve to the palm or index finger (Fig 5). We now prefer to reconstruct protective sensation using the proper digital nerve of the little finger, because when the dorsal branch of the ulnar nerve was reinnervated, sensation was not restored on the ulnar side of the little finger, only on the ulnar side of the hand.





**Figure 5. Schematic representation of procedures to restore sensation on the ulnar side of the hand in patients with a lower-type palsy of the brachial plexus. Either the palmar cutaneous branch of the median nerve was transferred to the dorsal branch of the ulnar nerve, or the proper digital nerve of the little finger was sutured to fascicles of the median nerve to the palm, either in association or not in association with fascicles raised from the proper ulnar digital nerve of the index finger**

## CONCLUSIONS

In partial injuries, brachial plexus surgery is highly rewarding. In total palsies, motion of the shoulder and elbow can be predictably reconstructed, provided that a root is available for grafting. If no root is available, only half of the patients will experience improved motion. Useful reconstruction of hand

function is not yet possible with total lesions. Finger flexion or wrist extension scoring M3, although reconstructed in a few cases, was not much appreciated by our patients. Thoracobrachial and forearm abdominal grasping was their preferred method for holding objects. Treatment of pain should be a first priority. In this regard, roots should be explored and grafted.

## REFERENCES

1. Robotti E, Longhi P, Verna G, Bocchiotti G. Brachial plexus surgery: an historical perspective. *Hand Clin* 1995, 4:517–533.
2. Bertelli JA, Ghizoni MF. Use of clinical signs and computed tomographymyelography findings in detecting and excluding nerve root avulsion in complete brachial plexus palsy. *J Neurosurg* 2006, 105:835–842.
3. Bertelli JA, Ghizoni MF. Contralateral motor rootlets and ipsilateral nervetransfers in brachial plexus reconstruction. *J Neurosurg* 2004, 101:770–778.
4. Bertelli JA, Ghizoni MF. Reconstruction of C5 and C6 brachial plexus avulsion injury by multiple nerve transfers: spinal accessory to suprascapular, ulnar fascicles to biceps branch, and triceps long or lateral head branch to axillary nerve. *J Hand Surg Am* 2004, 29:131–139.
5. Bertelli JA, Ghizoni MF. Nerve root grafting and distal nerve transfers for C5–C6 brachial plexus injuries. *J Hand Surg Am* 2010, 35:769–75.
6. Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpaiojkit C, Thuvasethakul P, Malungpaishrope K. Combined nerve transfers for C5 and C6 brachial plexus avulsion injury. *J Hand Surg Am* 2006, 31:183–189.

7. Oberlin C, Béal D, Leechavengvongs S, Salon A, Dauge MC, Sarcy JJ. Nerve transfer to biceps muscle using part of ulnar nerve for C6-C6 avulsion of the brachial plexus: anatomical study and report of four cases. *J Hand Surg Am* 1994, 1: 232-237.
8. Bertelli JA, Ghizoni MF. Results of grafting the anterior and posterior divisions of the upper trunk in complete palsies of the brachial plexus. *J Hand Surg Am* 2008, 33:1529-1540.
9. Bertelli JA, Ghizoni MF. Reconstruction of complete palsies of the adult brachial plexus by root grafting using long grafts and nerve transfers to target nerves. *J Hand Surg Am* 2010, 35:1640-1646.
10. Bertelli JA, Ghizoni MF. Results of C5 root grafting to the musculocutaneous nerve using pedicled, vascularized ulnar nerve grafts. *J Hand Surg Am*. 2009, 34:1821-1826.
11. Bertelli JA, Ghizoni MF, Loureiro Chaves DP. Sensory disturbances and pain complaints after brachial plexus root injury: A prospective study involving 150 adult patients. *Microsurgery* 2010, Oct 11. [Epub ahead of print] PubMed PMID:20939002.
12. Bertelli JA, Ghizoni MF. Pain after avulsion injuries and complete palsy of the brachial plexus: the possible role of non-avulsed roots in pain generation. *Neurosurgery* 2008, 62:1104-1113.
13. Wynn-Parry CB. Pain in avulsion lesions of the brachial plexus. *Pain* 1980; 9:41-53.
14. Bertelli JA, Ghizoni MF. The possible role of regenerating axons in pain persistence after brachial plexus grafting. *Microsurgery* 2010, 30:532-536.
15. Quintão NL, Santos AR, Campos MM, Calixto JB. The role of neurotrophic factors in genesis and maintenance of mechanical hypernociception after brachial plexus avulsion in mice. *Pain* 2008, 136:125-133.
16. Bertelli JA, Ghizoni MF. Brachialis muscle transfer to reconstruct fingerflexion or wrist extension in brachial plexus palsy. *J Hand Surg Am* 2006, 31:190-196.
17. Bertelli JA, Tacca CP, Duarte ECW, Ghizoni MF, Duarte H. Transfer of Axillary Nerve Branches to Reconstruct Elbow Extension in Tetraplegics: A Laboratory Investigation of Surgical Feasibility. *Microsurgery*, in press
18. Bertelli JA, Ghizoni MF, Tacca CP. Transfer of Teres Minor Motor Branch for Triceps Reinnervation in Tetraplegia: A Case Report. *J Neurosurg*, in press
19. Bertelli JA, Kechele PR, Santos MA, Besen BA, Duarte H. Anatomical feasibility of transferring supinator motor branches to the posterior interosseous nerve in C7-T1 brachial plexus palsies. Laboratory investigation. *J Neurosurg* 2009, 111:326-331.
20. Bertelli JA, Ghizoni MF. Transfer of supinator motor branches to the posterior interosseous nerve in C7-T1 brachial plexus palsy. *J Neurosurg* 2010, 113:129-132.
21. Bertelli JA, Ghizoni MF, Tacca CP. Transfer of the supinator muscle to the extensor pollicis brevis for thumb extension reconstruction in C7-T1 brachial plexus palsy. *J Hand Surg Eur* 2010, 35:29-31.
22. Mohammed KD, Rothwell AG, Sinclair SW, Willems SM, Bean AR. Upper-limb surgery for tetraplegia. *J Bone Joint Surg Br* 1992, 74:873-879.
23. Brandsma JW, Brand PW. Claw-finger correction. Considerations in choice of technique. *J Hand Surg Br* 1992, 17:615-621

**Авторы:****Jaime A. Bertelli** — MD, PhD.**Marcos Flávio Ghizoni** — MD.**Контакты:****Jaime Augusto Bertelli***Rua Newton Ramos, 70, Florianópolis, SC, 88015395, Brazil.**Fax: 55-48-32224028**email: bertelli@matrix.com.br*

Дж. А. Бертелли, М. Ф. Жицони

## ХИРУРГИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАЛИЧА ПЛЕЧЕВОГО СПЛЕТЕНИЯ У ВЗРОСЛЫХ

J. A. Bertelli, M. F. Ghizoni

### SURGICAL RECONSTRUCTION OF BRACHIAL PLEXUS PALSY IN ADULTS

*Центр биологических наук о здоровье, Университет Южной Санта Катарины, Бразилия*

© Бертелли Дж. А., Жицони М. Ф.

Мы изучили 358 взрослых пациентов с надключичными травмами плечевого сплетения за 7-летний период в университете Южной Санта Катарины, в Бразилии. Пациенты были разделены на 8 групп, согласно нарушению функции и уровню повреждения: C5–C6, C5–C7, C5–C8 (T1 кисть), C5–T1 (T2 кисть), C8–T1, C7–T1, C6–T1 и полный паралич. Чтобы восстановить функцию, используются нервная, сухожильная и мышечная пластики. У пациентов с верхним или низким типом частичного повреждения сплетения наблюдалось значительное восстановление функции. При полных параличах, если сегмент был доступен для пересадки нейрального лоскута, у 90 % пациентов было восстановлено сгибание локтевого сустава, тогда как этот показатель уменьшался до 50 %, если была выполнена пластика нервным трансплантатом. Приоритетом должна быть ликвидация боли, и пластика сегмента помогла уменьшить или удалить боль в короткие сроки после операции.

**Ключевые слова:** восстановление паралича плечевого сплетения, паралич плечевого сплетения, нервная пластика, пересадка нерва.

УДК 616.833.34-009.11-089.844:001.894

#### ВВЕДЕНИЕ

Травма плечевого сплетения — трагическое событие, которое обычно встречается в молодом возрасте. Только четыре десятилетия назад к хирургии плечевого сплетения все еще относились со значительным пессимизмом. В 1996 г. Международное Общество Ортопедической Хирургии и Травматологии (SICOT) в Париже заключило, что хирургическое лечение этих травм почти невозможно и, даже если выполнялось, не гарантировало результата [1]. Однако продолжающееся увеличение количества травм плечевого сплетения из-за несчастных случаев (аварий), без сомнения, вызвало интерес в этой области, и последние годы засвидетельствовали огромный прогресс хирургической техники лечения травм плечевого сплетения. В нашем учреждении между январем 2002 г. и декабрем 2008 г. было прооперировано 338 пациентов, страдающих от надключичного паралича плечевого сплетения. В настоящем докладе мы рассматриваем наши результаты и современные подходы к лечению.

#### ДИАГНОСТИКА ПАРАЛИЧЕЙ

У половины наших пациентов электрофизиологические исследования были возможны на предоперационном этапе. У 102 пациентов была проведена ЯМРТ плечевого сплетения, включая спинной мозг, тогда как КТ-миелография была выполнена во всех случаях. Клинический диагноз вовлечения корешков был правильным у 85 % наших пациентов. Наиболее значимыми симптомами были надключичный симптом Тинеля, указывающий на возможность пластики корешка, и симптом Горнера, свидетельствующий о нижнем разрыве корешка [2]. Электрофизиологические исследования не позволяли определить показания к хирургическому вмешательству. Следовательно, мы больше не проводим предоперационные электрофизиологические исследования. ЯМРТ была использована для подтверждения разрыва нижнего корешка. Однако симптом Горнера в 96 % был выявлен при поражении нижнего корешка. ЯМРТ бесполезна в определении возможности пластики корешка на уровне C5–C6, ввиду слабой визуализации



интрадуральной части этих корешков. Это — главная причина выполнения КТ-миелографии: подтверждение, что культя корешка, расположенная в надключичной области во время разрыва, находится в непрерывности со спинным мозгом и, таким образом, подходит для пластики.

#### **СРОКИ ОПЕРАТИВНОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА**

У пациентов с полным параличом плечевого сплетения при ДТП практически нет шансов на восстановление без оперативного лечения. У наших пациентов с полным параличом не наблюдалось самопроизвольного восстановления, в отличие от частичных разрывов, при которых может встречаться незначительное восстановление. Мы предпочитаем оперировать таких пациентов с 3-го по 6-й месяцы после раны. Некоторые из наших пациентов были прооперированы после седьмого месяца с хорошими результатами. Однако спустя 9 месяцев после травмы наши результаты резко ухудшились.

При частичном поражении мы наблюдали хорошие результаты даже спустя 10 месяцев после оперативного вмешательства (пластике нерва). Этого не наблюдалось у больных с полным параличом, у которых пластика нерва была выполнена через 10 месяцев и более после травмы [3].

#### **ДИАГНОСТИКА ПАРАЛИЧА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ**

##### **ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА C5–C6**

Эта группа состояла из пациентов с параличом, включающим отведение плеча и внешнюю ротацию, сгибание локтя и супинацию предплечья. М. *coracobrachialis* была иннервирована у всех пациентов. М. *flexor carpi radialis* и м. *pronator teres* слабо функционировали. Сгибание запястья было сохранено, потому что м. *palmaris longus* и *flexor carpi ulnaris* были не повреждены. Верхняя головка большой грудной мышцы была парализована или ослаблена, но при

Таблица 1

#### **Сжатие кисти, пальцев и разгибание запястья, предплечья в группах паралича**

Тип паралича	Сила сжатия кисти (кг)	Сила сжатия пальцев (кг)	Разгибание запястья (кг)	Разгибание предплечья (кг)
C5–C6	26,3 (95 % CI, 22,9–229,7)	8 (95 % CI, 7,1–8,8)	7,1 (95 % CI, 6,1–8,1)	7,8 (95 % CI, 6–9,5)
C5–C7	14,7 (95 % CI, 8,7–20,7)	6 (95 % CI, 4,8–7,1)	5,6 (95 % CI, 5,1–6,2)	4,8 (95 % CI, 4,2–5,4)
C5–C8	13 (95 % CI 9,7–16,3)	4 (95 % CI 2,8–5,3)	парализовано или крайне слабое	парализовано
C5–T1	крайне слабое	крайне слабое	парализовано или крайне слабое	парализовано
Норма	38 (95 % CI, 36,6–39,4)	10,1 (95 % CI, 9,2–10,9)	13 (95 % CI, 11,4–14,5)	11,8 (95 % CI, 10,4–13,2)

Сила сжатия кисти, пальцев и разгибания запястья, предплечья в группах с параличом и на здоровой конечности. Во всех группах сила была значительно меньше, чем на здоровой стороне ( $p < 0,005$ ). Сила сжатия кисти с травмой C5–C6, C5–C7 и C5–C8 была 70 %, 40 % и 36 % от силы здоровой конечности соответственно. Все межгрупповые различия были статистически значимы, однако только различия между группами C5–C6 и C5–C7 можно рассматривать клинически значимыми. Сила сжатия пальцев была 80 %, 60 % и 40 % от нормы с травмой C5–C6, C5–C7 и C5–C8, соответственно. Эти различия статистически ( $p < 0,05$ ) и клинически значимы. Сила разгибания кисти были 55 %, 43 % и 0 % в группах с параличом C5–C6, C5–C7 и C5–C8 соответственно, а сила разгибания предплечья была соответственно 66 %, 41 % и 0 %. Эти различия в силе разгибания запястья и предплечья были статистически значимы ( $p < 0,05$ ).

сопротивлении приведению не возникало выраженной атрофии мышцы. Сила сжатия кисти составила 68 % от силы неповрежденной кисти, сила сжатия пальцев — 80 % от нормы. Сила разгибания запястья была 55 %, в то время как разгибание локтевого сустава 66 % от нормальных величин (табл. 1). Кисть сохраняла нормальную тактильную чувствительность, однако вдоль наружной поверхности предплечья наблюдалась зона пониженной чувствительности, направляющаяся к большому пальцу, но необязательно достигающая его. Вторая зона сниженной чувствительности наблюдалась в проекции дельтовидной мышцы (рис. 1)\*.

\*Рисунки представлены в английской версии статьи.

## ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА C5–C7

Клиническая картина с этим поражением была подобна той, что мы наблюдали в группе паралича C5–C6. Разгибание кисти, пальцев и предплечья были сохранены, но сила значительно меньше, чем у пациентов C5–C6 (табл. 1). Верхняя часть грудных мышц была атрофирована. *M. latissimus dorsi* была парализована у половины пациентов. *M. flexor carpi radialis* и *m. pronator teres* парализованы. Наблюдалось значительное снижение тактильной чувствительности, однако болевая чувствительность сохранена. Сила сжатия кисти составляла только 39 % от здоровой конечности, тогда как сила сжатия пальцев — 60 % от нормальной величины. Сила разгибания запястья и локтевого сустава составляли 43 % и 41 % от нормы, соответственно. Сравнительно с группой C5–C6 сила сжатия кисти, пальца, разгибание запястья и предплечья были значимо меньше ( $p < 0,05$ ). Во всех пальцах наблюдалось снижение тактильной чувствительности, преимущественно большого пальца. Однако болевая чувствительность была сохранена по всей конечности. Вдоль наружной поверхности плеча и предплечья, в проекции дельтовидной мышцы имела обширная зона анестезии (рис. 1).

ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА C5–C8  
(T1 КИСТЬ)

Дополнительно к параличу сгибания плеча и предплечья были парализованы *m. teres mayor*, *m. latissimus dorsi*, *m. triceps*, *m. pectoralis major*. Разгибание запястья отсутствовало у всех пациентов, однако у некоторых оно было реализовано за счет разгибания пальцев. В этих случаях сила разгибания запястья не превышала 1 кг. У некоторых пациентов было сохранено разгибание только I–II пальцев. Трехглавая мышца, *m. carpi radialis*, *m. pronator teres* и *m. carpi ulnaris* были парализованы. Сгибание запястья и пронация были возможны за счет функционирования *m. palmaris longus* и *m. pronator quadratus* соответственно. Сила сжатия кисти составляла 36 % от здоровой конечности, а сила сжатия пальцев — 40 % от нормы (табл. 1). По сравнению с группами C5–C6±C7, сила сжатия кисти и пальца были значимо меньше ( $p < 0,05$ ). В среднем сила сжатия пальцев уменьшилась на 20 %, а снижение силы сжатия кисти составило 3 %. Нарушение болевой чувствительности аналогично нарушению в предыдущей группе, однако эта область была шире,

включала 1/3 окружности верхней конечности. В отличие от предыдущей группы, в процесс вовлекались тыльная и локтевая поверхности. Что касается пальцев, специфического нарушения тактильной чувствительности не наблюдалось. Однако несколько пациентов предъявляли жалобы на анестезию большого пальца, в то время как у других пациентов чувствительность была сохранена у всех пальцев. Ни один случай не сопровождался полной анестезией всех пальцев (рис. 1). Симптом Горнера отсутствовал.

ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА C5–T1  
С ЧАСТИЧНО СОХРАНЕННЫМ  
СГИБАНИЕМ ПАЛЬЦЕВ И СИМПТОМОМ  
ГОРНЕРА (T2 КИСТЬ)

У этих пациентов было полностью парализовано плечо. Приведение было невозможно, потому что имелся полный паралич *m. pectoralis major*. Разгибание пальцев и запястья отсутствовало. Сгибание запястья было слабым, но сохранялось у половины пациентов благодаря функционирующей *m. palmaris longus*. Сгибание пальцев было отмечено во всех случаях, однако амплитуда движения была неполной. Сила сжатия кисти и пальцев не измерялись из-за выраженной мышечной слабости. Довольно часто встречалась анестезия I пальца, полностью отсутствовала чувствительность на тыльной поверхности кисти. Наружная продольная область сниженной чувствительности на предплечье и плече теперь включала 2/3 окружности конечности (рис. 1). Сохранялась зона нормальной чувствительности по локтевому краю предплечья. Складывалось впечатление, что у этих пациентов была или необнаруженная частичная травма корешка T1, хотя КТ-миелография подтвердила разрыв; или, что более вероятно, связь плечевого сплетения с сегментом T2. Мы называем эту когорту пациентов группой «T2 кисть».

## ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА C8–T1

Сгибание предплечья и плеча было сохранено (табл. 2). Разгибание пальцев и кисти также было сохранено. *M. flexor carpi radialis* было не повреждено, но *m. flexor carpi ulnaris* и *m. palmaris longus* были парализованы. *M. pronator teres* был сохранен. Собственные мышцы кисти были частично сохранены. *M. flexor pollicis longus* парализован. Сила разгибания запястья составляла

73 % от здоровой конечности. Сгибание в локтевых суставах одинаково с обеих сторон. Нарушение чувствительности присутствовало по локтевому краю предплечья и кисти. Симптом Горнера присутствовал во всех случаях, КТ определяла разрыв С8 и Т1 у всех пациентов.

#### ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА С7–Т1

Группа пациентов с более обширным повреждением, у которых в области иннервации верхних корешков плечевого сплетения восстановление функции происходило самостоятельно. Амплитуда движений плеча и локтя была сохранена. Однако сила мышечного сокращения была значительно меньше ( $p < 0,05$ ) относительно здоровой конечности пациента и относительно поврежденной конечности в группе паралича С8–Т1 (табл. 2). Например, сила сгибания в локтевом суставе составляла 61 %, а сила трехглавой мышцы — только 25 % от силы здоровой конечности. Разгибание запястья было ослаблено, составляло 46 % от противоположной стороны. *M. extensor carpi radialis brevis et longus* функционировали, но *m. extensor carpi ulnaris* была парализована. Расстройство чувствительности присутствовало по локтевой поверхности кисти, предплечья и плеча. В противоположность группе С8–Т1, снижение чувствительности определялось в III пальце. Чувствительность I пальца сохранена.

#### ПОВРЕЖДЕНИЕ КОРЕШКА С6–Т1

Мы наблюдали 4 пациентов с параличом (сгибания и разгибания) пальцев, сопровождаемым ослаблением разгибания запястья и параличом трехглавой мышцы. Вышеуказанные нарушения являются основным отличием от предыдущей группы. Движение в плечевом суставе и сгибание локтевого сустава были сохранены. Хирургическое вмешательство не выполнялось для исследования плечевого сплетения; следовательно, состояние корешков не было осмотрено непосредственно. На КТ разрыв С7–Т1 был подтвержден во всех случаях. Клиническая картина повреждения С6 не была ясна. Наиболее вероятно, это была частичная травма со спонтанным восстановлением. Важно то, что в этой группе пациентов обязательно восстановление разгибания в локтевом суставе.

Таблица 2

#### Оценка силы сгибания/разгибания предплечья и разгибания запястья при параличах С8–Т1 и С7–Т1

Тип паралича	Сгибание предплечья/кг	Разгибание предплечья/кг	Разгибание запястья/кг
С8–Т1	16,2 (95 % CI, 13,5–18,9)	12,5 (95 % CI, 7,9 17)	9,5 (95 % CI, 6,7–12,2)
С7–Т1	11,6 (95 % CI, 10,6–12,6)	3 (95 % CI, 1,7–4,2)	6 (95 % CI, 3,6–8,3)
Норма	19 (17,2–20,7)	11,8 (10,4–13,2)	13 (95 % CI, 11,4–14,5)

Оценка силы сгибания/разгибания предплечья и разгибания запястья при параличах С8–Т1 и С7–Т1. Сила в С7–Т1 была значимо ( $p < 0,05$ ) снижена относительно здоровой конечности. Сила в группе с травмой С8–Т1 не отличалась от нормальных величин. В группе С7–Т1 сила разгибания запястья и предплечья были 25 % и 46 % от нормы, соответственно.

#### ПОЛНЫЙ ПАРАЛИЧ

У всех этих пациентов наблюдался симптом Горнера. Нарушение чувствительности наблюдалось по всей конечности, за исключением внутренней поверхности плеча.

#### ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ

##### ВЕРХНИЙ ТИП ПАРАЛИЧА (С5–С6 +/- С7)

У этих пациентов сгибание в локтевом суставе и отведение/наружная ротация плеча являются недостающими функциями, требующими реконструкции. Когда указанные корешки повреждены, что встречалось только у 22 % наших пациентов, реконструкция была достигнута тройной невротизацией:

- 1) транспозиция добавочного нерва к надлопаточному нерву;
- 2) транспозиция двигательной ветви длинной головки трицепса к передней части подмышечного нерва и к двигательной ветви *m. teres minor*;
- 3) транспозиция пучков локтевого нерва к двигательной ветви *m. biceps brachii* [4].

Мы выполняем транспозицию № 2, используя подмышечный доступ (рис. 2).

Сравнивая результаты пациентов, которым была выполнена тройная невротизация, с пациентами, у которых была проведена наряду с невротизацией и пластика верхнего ствола, мы наблюдали лучшие результаты при комбинированной методике [5]. Мы полагаем, что пластика корешка



была полезна для реиннервации мышц антагонистов и стабилизаторов плеча, чего не происходит при транспозиции нервов. Например, когда оказывается сопротивление сгибанию предплечья, сокращение *m. pectoralis major* легко достигается, даже хотя сокращение *m. pectoralis major* не сгибает предплечье. Сокращением большой грудной мышцы стабилизируется плечевой сустав. Кроме того, мы отметили, что у пациентов с пластикой корешков C5 и C6, при которой *n. suprascapularis* был соединен с XI черепно-мозговым нервом и пучки локтевого нерва были перенесены к двигательной ветви *m. biceps brachii* без транспозиции двигательной ветви длинной головки трицепса к подмышечному нерву, меньше восстанавливалась наружная ротация, чем у пациентов, которым была выполнена тройная невротизация. Восстановление наружной ротации у этих пациентов — самое сложное. Поэтому, вопреки рекомендациям других хирургов [6], мы полагаем, что ветви *m. triceps brachii* должны быть последовательно невротизированы не только передней ветвью подмышечного нерва, но и двигательной ветвью *m. teres minor*. Следовательно, наше мнение таково, что, когда имеются даже два корешка с возможностью пластики, мы выполняем пластику корешков верхнего ствола и тройную нейральную транспозицию.

Наши результаты реконструкции разрывов плечевого сплетения верхнего типа обнадеживают. Максимальное отведение и наружная ротация плеча были восстановлены у 15 % пациентов с разрывом C5 и C6, которым была выполнена тройная невротизация, у 67 % пациентов с пластикой нервного корешка C5 в сочетании с тройной невротизацией и у 33 % пациентов с пластикой C5–C6 нервных корешков и транспозицией XI ЧМН к *n. suprascapularis*, пучков локтевого нерва к двигательной ветви *m. biceps brachii*. Средний процент восстановления силы сгибания локтевого сустава по сравнению со здоровой стороной составил 27 %, 43 % и 59 % у пациентов с разрывом нервных корешков C5–C6, пластикой нервного корешка C5 и с пластикой нервных корешков C5–C6, соответственно. Следовательно, комбинация пластики нервных корешков с дистальной транспозицией нервов, по-видимому, также увеличивает силу сгибания в локтевом суставе.

### Т1 КИСТЬ

При возможности выполнения пластики C5 нервного корешка она выполнялась передней или

задней частью верхнего ствола. Мы не наблюдали значимых различий в восстановлении движений при использовании для пластики передней или задней части верхнего ствола, возможно, по причине малого количества пациентов. В группе «Т1 кисть» восстановление разгибания предплечья требовало реконструкции. У нескольких пациентов мы использовали срединный нерв для невротизации двигательной ветви *m. biceps brachii*, в то время как пучки локтевого нерва использовали для невротизации двигательной ветви длинной головки *m. triceps brachii*. Ни у одного из этих пациентов не наблюдалось полного восстановления сгибания и разгибания в локтевом суставе. Впоследствии мы перестали выполнять реиннервацию пучками локтевого нерва.

В другой группе из 4 пациентов мы выполняли транспозицию межреберного нерва к двигательной ветви длинной головки *m. triceps brachii*, однако достичь положительных результатов не удалось, возможно, из-за недостаточной реиннервации или ухудшения двигательного контроля. В данном случае мы выполняем транспозицию двигательной ветви *m. levator scapulae* к двигательной ветви длинной головки *m. triceps brachii* с помощью трансплантата из икроножного нерва. Восстановление разгибания в локтевом суставе слабое, но полностью находится под произвольным контролем, а при необходимости восстановления разгибания пальцев кисти сухожильной пластикой, важен контроль произвольных движений в локтевом суставе для его стабилизации.

Необходимо отметить следующее: если двигательные пучки *m. flexor ulnaris* (FCU) использовать для реиннервации *m. biceps*, а затем выполнить транспозицию FCU к *m. extensor digitorum communis* (EDC) и *m. extensor pollicis longus* (EPL) для восстановления паралича, то результаты будут незначительные. Когда пациент разгибает пальцы кисти за счет FCU, одновременно происходит сгибание в локтевом суставе. В группе «Т1 кисть» пучки локтевого нерва, иннервирующие собственные мышцы кисти, следует использовать для восстановления сгибания пальцев вместо пучков FCU, что первоначально было предложено Oberlin и др [7]. Транспозиция пучков локтевого нерва, иннервирующих собственные мышцы кисти, не ухудшает функцию последней [5].

Другое интересное наблюдение, которое мы сделали, состоит в том, что в группе «Т1 кисть» интраоперационная электростимуляция срединного нерва вызывает более сильное движение пальца, чем при стимуляции локтевого нерва. Следовательно, в этой группе мы всегда выделяем

оба нерва, стимулируем их, и затем используем более «сильный» нерв в качестве донора нервных пучков для реиннервации бицепса.

### ПОЛНЫЙ ПАРАЛИЧ

#### **А) с возможностью пластики корешков**

У 87 % наших пациентов с тотальным параличом пластика корешков была возможна [2]. У всех пациентов выполнялась транспозиция добавочного нерва к п. *suprascapularis*, который обеспечивает в среднем 57 градусов приведения плеча. Когда возможна пластика двух корешков, обычно C5+C6, пластику C5 выполняли передней частью, а C6 — задней частью верхнего ствола. Трансплантат икроножного нерва был длиной не более 10 см. После оперативного лечения реиннервация мышц предплечья была крайне слабой. У некоторых пациентов восстанавливалось сгибание запястья и пальцев, хотя было слабым. Мы считаем уровень МЗ сгибания пальцев бесполезным, потому что наши пациенты не использовали поврежденную кисть для активного захвата. Сгибание и разгибание в локтевом суставе не может быть восстановлено одновременно. Сгибание предплечья до МЗ и более было у 85 % этих пациентов. Сгибание локтевого сустава всегда сопровождалось сокращением *m. pectoralis major* [8].

Во второй группе пациентов пластика C5 была выполнена дистальнее: латеральной частью ствола или кожно-мышечным нервом. При возможности, пластика C6 была выполнена лучевым нервом. *M. pectoralis major* была реиннервирована ветвями нерва *m. platysma*, тогда как длинная головка *m. triceps brachii* — ветвями нерва *m. levator scapulae*. Сгибание локтевого сустава до МЗ и лучше наблюдалось у 91 % пациентов; процент повышался, когда короткие трансплантаты анастомозировали с верхним стволом [8, 9]. Эти находки могут быть результатом двойного разрыва кожно-мышечного нерва, который наблюдался у 18 % наших пациентов [9] и был диагностирован только после обследования надключичной части плечевого сплетения [8]. Транспозиция двигательной ветви *m. levator scapulae* к длинной головке *m. triceps brachii* слабо восстанавливало разгибание локтевого сустава. Использование лучевого нерва при реконструкции корешка C6 было чаще всего непредсказуемо. Хотя часть результатов успешна, окончательные выводы относительно транспозиции двигательного нерва *m. platysma* к п. *pectoralis medialis* не могут быть сделаны.

В III группе пациентов мы выполняли пластику корешка C5 с помощью васкуляризированного трансплантата локтевого нерва [10]. Результаты были незначительные. На наш взгляд, безуспешность может быть связана с длиной трансплантата и его неблагоприятным внутренним строением. Возможно, что регенерация в длинном, кровоснабжаемом стволе трансплантата хуже, чем при аналогичной пластике икроножным нервным трансплантатом. После этого мы перестали применять кровоснабжаемый трансплантат локтевого нерва. При тотальном параличе в настоящее время мы выполняем пластику корешка с помощью более длинных трансплантатов.

При тотальном параличе плечевого сплетения обязательна жизнеспособность корешка. Тогда появляется возможность не только восстановления нерва, но и уменьшается болевой синдром. При полном повреждении 84 % пациентов испытывают боль и почти у 84 % возможна пластика корешков [2, 11]. Боль уменьшилась у половины пациентов через несколько дней после операции. Мы убеждены, что боль при травмах плечевого сплетения от разрыва больше, чем при раздавливании нерва [12], что ставит под сомнение текущую концепцию о деафферентации как об источнике боли [13]. У пациентов, перенесших пластику корешков, сохранившийся болевой синдром мы связываем с ростом аксонов, потому что этот процесс связан с продукцией большого количества нейротрофических факторов, вызывающих боль [14, 15].

#### **В) пластика корешков невозможна**

У этих пациентов не только невозможна пластика корешков, но и нервы для транспозиции (добавочный и диафрагмальный) могут быть также недоступны. После операции только у половины этих пациентов достигается появление сгибания локтевого сустава при использовании диафрагмального нерва, противоположного C7, или подъязычного нерва. Для невротизации надлопаточного нерва мы применяли добавочный нерв, противоположный C7, подъязычный нерв, шейное сплетение или двигательные ветви *m. platysma*. Отведение плеча восстановилось у половины пациентов, в среднем до 28°. Результаты реконструкции при тотальном параличе при невозможности пластики спинномозговых нервов несомненно хуже, чем при нервах с возможностью пластики. Это предполагает, что для восстановления сгибания предплечья пластика спинномозговых нервов лучше, чем транспозиция нервов, не относящихся к плечевому

сплетению. Протяженная травма также может повреждать донорские нервы, необходимые для транспозиции. Так, результаты по отведению плеча при транспозиции XI черепно-мозгового нерва к надлопаточному нерву были хуже, чем при пластике корешков. Возможно, это было вызвано не только сочетанным повреждением добавочного нерва, но и протяженной травмой, влияющей на надлопаточный нерв.

### НИЖНИЙ ТИП ПАРАЛИЧА

У всех пациентов сгибание пальцев было восстановлено транспозицией плечевой мышцы к *m. flexor digitorum profundus* и *flexor pollicis longus* [15]. Натяжение мышцы было установлено индивидуально, согласно потребностям пациентов. Восстановление силы захвата до 2 кг позволяло нашим пациентам применять кисть в ежедневной деятельности. У некоторых пациентов сила захвата восстановлена свыше 8 кг, так как большее натяжение было применено при транспозиции. Увеличение силы захвата происходит при разгибании предплечья. Сильное разгибание кисти полезно для увеличения амплитуды движений и силы сгибания пальцев. Тем не менее, при большем натяжении трансплантата плечевой мышцы может пострадать амплитуда движений кистевого сустава. Это особенно важно для восстановления движений I пальца. У двух пациентов, кроме транспозиции плечевой мышцы, вторым этапом выполнили транспозицию *m. brachioradialis* к *m. flexor digitorum superficialis* и *flexor pollicis longus*. У этих двух пациентов сила захвата улучшилась на 50 % с сохранением амплитуды движений кистевого сустава.

Разгибание предплечья было восстановлено транспозицией задней части дельтовидной мышцы к *m. triceps brachii* с помощью трансплантата *fascia lata*. Всем 4 пациентам восстановлена достаточная стабильность локтевого сустава с сухожильной пластикой для восстановления кисти. Только у 1 пациента восстановилось разгибание предплечья до М4, у остальных до М3. Если операция выполняется до 6 мес. после травмы, мы предпочитаем восстанавливать разгибание предплечья транспозицией двигательной ветви задней дельтовидной мышцы или двигательной ветви *m. teres minor*, как при тетраплегии [17, 18].

Разгибание пальцев было успешно восстановлено транспозицией двигательной ветви *m. supinator* к заднему межкостному нерву [19, 20].

Тенодез EDC и EPL безуспешен. Плохие результаты также от транспозиции *extensor carpi radialis longus* or *brachioradialis* к *extensor digitorum communis*. При застарелых травмах, учитывая плохие результаты реконструкции нерва и сухожильной пластики, наша тактика заключается в восстановлении разгибания пальцев свободным лоскутом *m. gracilis*, реиннервированным двигательным нервом *m. supinator* (рис. 3). Когда *m. extensor carpi radialis* и *m. brachioradialis* функционируют, нерв *m. supinator* всегда сохранен и доступен в качестве донора для транспозиции [20].

Стабилизация I пальца тенодезом *abductor pollicis longus* на тыле лучевой кости или к FCU вызывает частичное улучшение. Хороший результат по стабилизации I пальца и его натяжения появляется при транспозиции двигательной ветви *m. supinator* к заднему межкостному нерву [20]. Хороший результат мы также наблюдали у двух пациентов с застарелым повреждением, которым выполнена транспозиция *m. supinator* к *m. extensor pollicis brevis* с сухожильным трансплантатом [21]. При необходимости, стабилизация межфалангового сустава большого пальца была достигнута транспозицией половины *flexor pollicis longus* к EPL [22].

Нами было предпринято восстановление функции собственных мышц (пальцев) путем смещения участка кожи над дистальной ладонной складкой и подшивания проксимальной дермы и ладонного апоневроза к поперечной связке A1 (рис. 4). Если функция длинных разгибателей пальцев была сохранена или восстановлена транспозицией нервов, наблюдался хороший результат. В противном случае результат был плохим. У пациентов с плохими результатами мы попытались улучшить функцию собственных мышц транспозицией *m. extensor carpi radialis brevis*, удлинённой четырьмя сухожильными трансплантатами к межкостным сухожилиям по Brand [23]. Это не улучшило разгибания в проксимальных межфаланговых суставах пальцев. Когда *m. extensor indicis proprius* был сохранен, его успешно использовали для восстановления отведения большого пальца.

Чувствительность локтевой поверхности кисти мы восстанавливали транспозицией ладонной ветви срединного нерва к тыльной ветви локтевого нерва или соединением собственного пальцевого нерва V пальца с пучками срединного нерва ладони или указательного пальца (рис. 5). Сейчас мы предпочитаем восстанавливать болевую чувствительность, используя собственный пальцевой нерв V пальца, потому что когда



реиннервируется тыльная ветвь локтевого нерва, чувствительность по локтевой поверхности V пальца не восстанавливается, а реиннервируется только локтевая поверхность кисти.

## ВЫВОДЫ

При частичных повреждениях хирургия плечевого нервного сплетения очень востребована. При тотальном параличе движения плеча и предплечья могут быть предсказуемо восстановлены при наличии возможности пластики спинномозговых нервов. Если пластика

спинномозгового нерва невозможна, тогда только у половины пациентов улучшатся движения. Успешное восстановление функции кисти невозможно при тотальном повреждении плечевого сплетения. Появление сгибания пальцев и разгибания запястья до уровня МЗ, восстановленное в нескольких случаях, не было оценено по достоинству нашими пациентами. Плече-грудной и предплечье-абдоминальный захват был их преимущественным методом удерживания предметов. Лечение боли должно быть первоочередным приоритетом. В связи с этим, спинномозговые нервы должны быть обследованы и восстановлены.

*Поступила в редакцию 15.04.2011*

*Утверждена к печати 15.05.2011*

## Перевод, контакты:

**Серяков Виктор Иванович** — канд. мед. наук, врач-хирург АНО НИИ микрохирургии ТНЦ СО РАМН, г. Томск.

*e-mail: vizor76@sibmail.com.*

## Описание рисунков:

Рис. 1. Зоны утраченной болевой чувствительности при различных типах паралича плечевого сплетения. Разметка была выполнена с помощью монофиламентов Semmes-Weinstein. В группе C5-C6, чувствительность кисти была полностью сохранена. В группе C5-C7 чувствительность кисти была снижена, но еще оставалась в пределах нормы. Продольная зона утраченной чувствительности была по наружной поверхности предплечья и плеча. В группе паралича C5-C8 была подобная продольная зона отсутствия чувствительности по наружной поверхности плеча и предплечья, кисти. По ладонной поверхности кисти чувствительность снижена в различной степени. Больше половины пациентов имели нормальную чувствительность и половина пациентов подверглись анестезии большого пальца. У пациентов с травмой C5-T1 наблюдалась малая зона сохраненной чувствительности по внутренней поверхности предплечья. Чувствительность кисти была заметно снижена. Была анестезия большого пальца, тактильная чувствительность пальцев сохранена (вкладка). В группе паралича C8-T1 потеря тактильной чувствительности определялась по внутренней поверхности предплечья и по локтевым поверхностям пальцев. В группе паралича C7-T1 была вовлечена также внутренняя поверхность плеча с пальцами.

Рис. 2. Интраоперационный вид левого подмышечного доступа для невротизации передней части (AD) подмышечного нерва и двигательной ветви m. teres minor. Через такой же доступ выполняется транспозиция пучков локтевого нерва к двигательной ветви m. biceps brachii. Задняя часть подмышечного нерва (PD) и его ветви: (ТМ) двигательная ветвь m. teres minor, (РОД) ветвь задней дельтовидной мышцы, и (СВ) латеральный кожный нерв плеча.

Рис. 3. А) Интраоперационный вид предплечья у пациента с застарелым нижним типом травмы плечевого сплетения. Восстановление разгибания пальцев выполнено свободным лоскутом m. gracilis, иннервированным нервом m. supinator. В) Отмечена m. gracilis. Артерия m. gracilis соединена «конец-в-бок» с лучевой артерией, тогда как одна из вен m. gracilis анастомозирована «конец-в-конец» с лучевой веной. Двигательная ветвь m. gracilis соединена с n. supinator. С) Результат через 12 мес. после операции. Этот пациент способен разгибать пальцы. Стрелкой отмечена трансплантированная m. gracilis.

Рис. 4. Интраоперационный вид дермодеза для коррекции пястно-фалангового переразгибания у пациентов с нижним типом паралича правого плечевого сплетения. После резекции участка кожи на середине дистальной ладонной складки сшивается поперечная связка A1 с ладонным апоневрозом и проксимальной дермой.

Рис. 5. Схематическое представление метода восстановления чувствительности локтевой поверхности кисти у пациентов с нижним типом паралича плечевого сплетения. Выполняется транспозиция ладонной кожной ветви срединного нерва к тыльной ветви локтевого нерва или собственного пальцевого нерва мизинца.