

УДК 55(1/9)

**РЕКОНСТРУКЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ ПО ГЕОЛОГО-КИНЕМАТИЧЕСКИМ  
ИНДИКАТОРАМ**

**Агибалов А.О.<sup>1</sup>, Бондарь И.В.<sup>2</sup>, Зайцев В.А.<sup>1</sup>, Сенцов А.А.<sup>2</sup>, Бардышев Г.П.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00359 «Оценка новейшей и современной геодинамической активности докембрийских купольно-надвиговых структур Приладожья»*

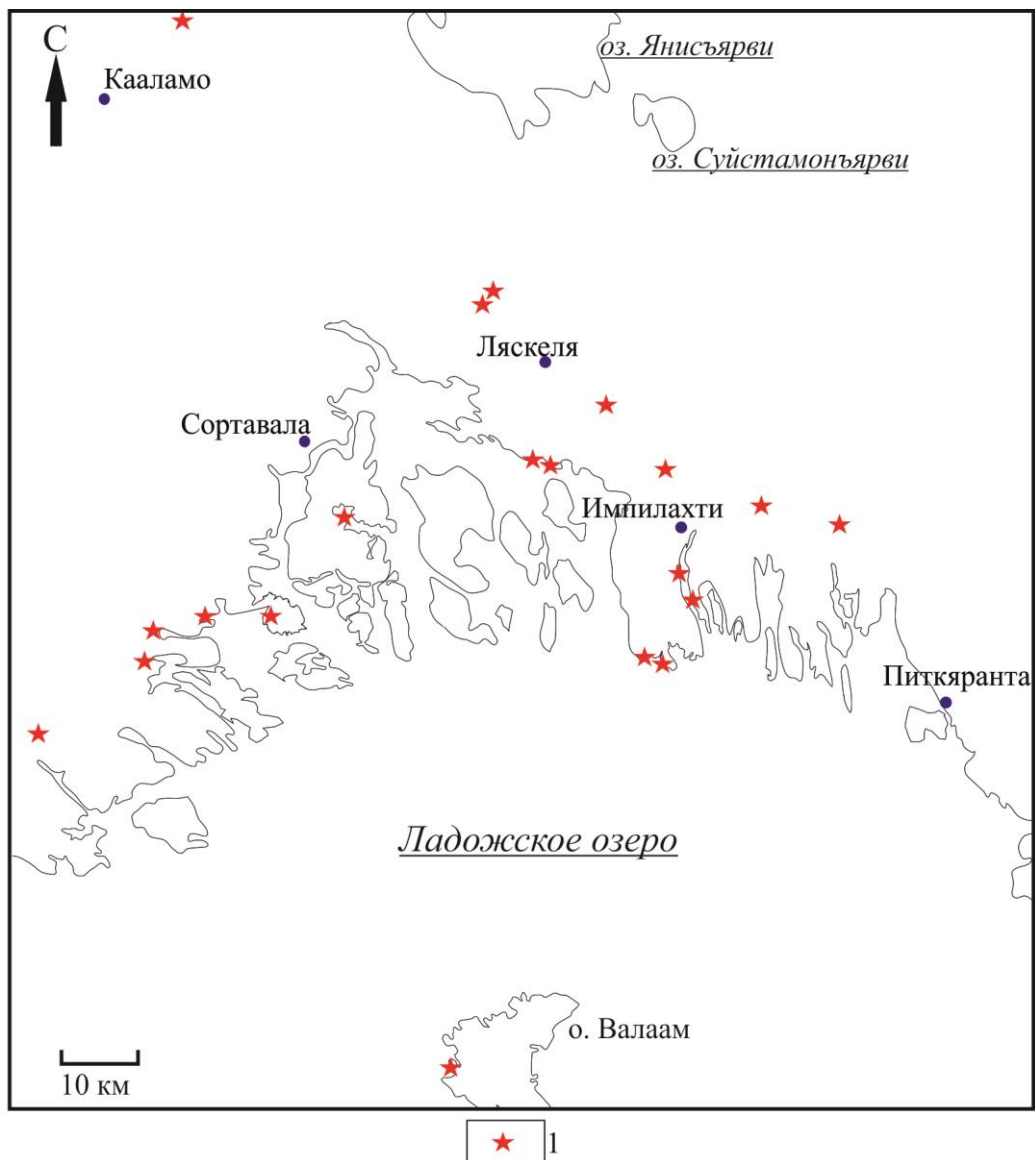
**ВВЕДЕНИЕ**

Авторами данной работы на основании ранее проведенного тектонофизического моделирования было сделано предположение о том, что в новейшее время большая часть территории Северного Приладожья развивается в обстановке субгоризонтального северо-западного сжатия, а неотектоническая активизация Ладожского грабена реализуется в условиях северо-восточного растяжения. Для того чтобы проверить обоснованность данного предположения была проведена реконструкция положения главных нормальных осей напряжений по массовым замерам зеркал и борозд тектонического скольжения и элементов залегания поверхностей сместителей разрывных нарушений, зафиксированных в рыхлых отложениях позднего неоплейстоцена. Описание изученных разрывов, интерпретируемых как палеосейсмодислокации, приведено в работе [Агибалов и др., 2018]. Расположения точек, в которых выполнялись замеры, показано на рис. 1 и 2.

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

За время полевых работ, проводившихся на территории Северного Приладожья, были собраны 43 замера зеркал и борозд тектонического скольжения и 12 замеров элементов залегания поверхностей разрывных нарушений, проявленных в четвертичных отложениях. Для реконструкции положения главных нормальных осей напряжений используются следующие параметры: азимуты и углы падения поверхностей зеркал скольжения (или разрывов), угол  $\beta$ , показывающий, каким образом ориентированы борозды скольжения относительно линии простирания поверхности зеркала, и кинематический тип трещины (разрыва). Если борозды ориентированы по направлению простирания трещины, то угол  $\beta=0^0$ ; если борозды ориентированы вдоль линии падения, угол  $\beta=90^0$ . При развороте борозд относительно линии падения трещины по часовой стрелке угол  $\beta$  считается отрицательным,

против часовой стрелки – положительным (рис. 3). Для разрывных нарушений принято, что  $\beta=90^0$  (табл. 1; 2). Методика обработки замеров зеркал скольжения с помощью разработанной Ю.Л. Ребецким программы STRESSgeol предполагает автоматизированное разделение всех замеров на соответствующие разным деформационным этапам однородные выборки, для каждой из которых рассчитываются параметры тензора напряжений [Ребецкий и др., 2017]. Разделение зеркал скольжения на такие выборки подчиняется принципу максимальности уменьшения (диссипации) энергии упругих деформаций при минимальном количестве этапов напряженного состояния. Иными словами, автоматизированный анализ зеркал скольжения предполагает поиск такого напряженного состояния, при котором смещение вдоль каждой трещины приводит к уменьшению упругой энергии, а на совокупности сколов одной выборки достигается максимальный сброс упругой энергии.



**Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения, в которых проводились замеры зеркал и борозд тектонического скольжения: 1 – точки замеров зеркал и борозд скольжения**

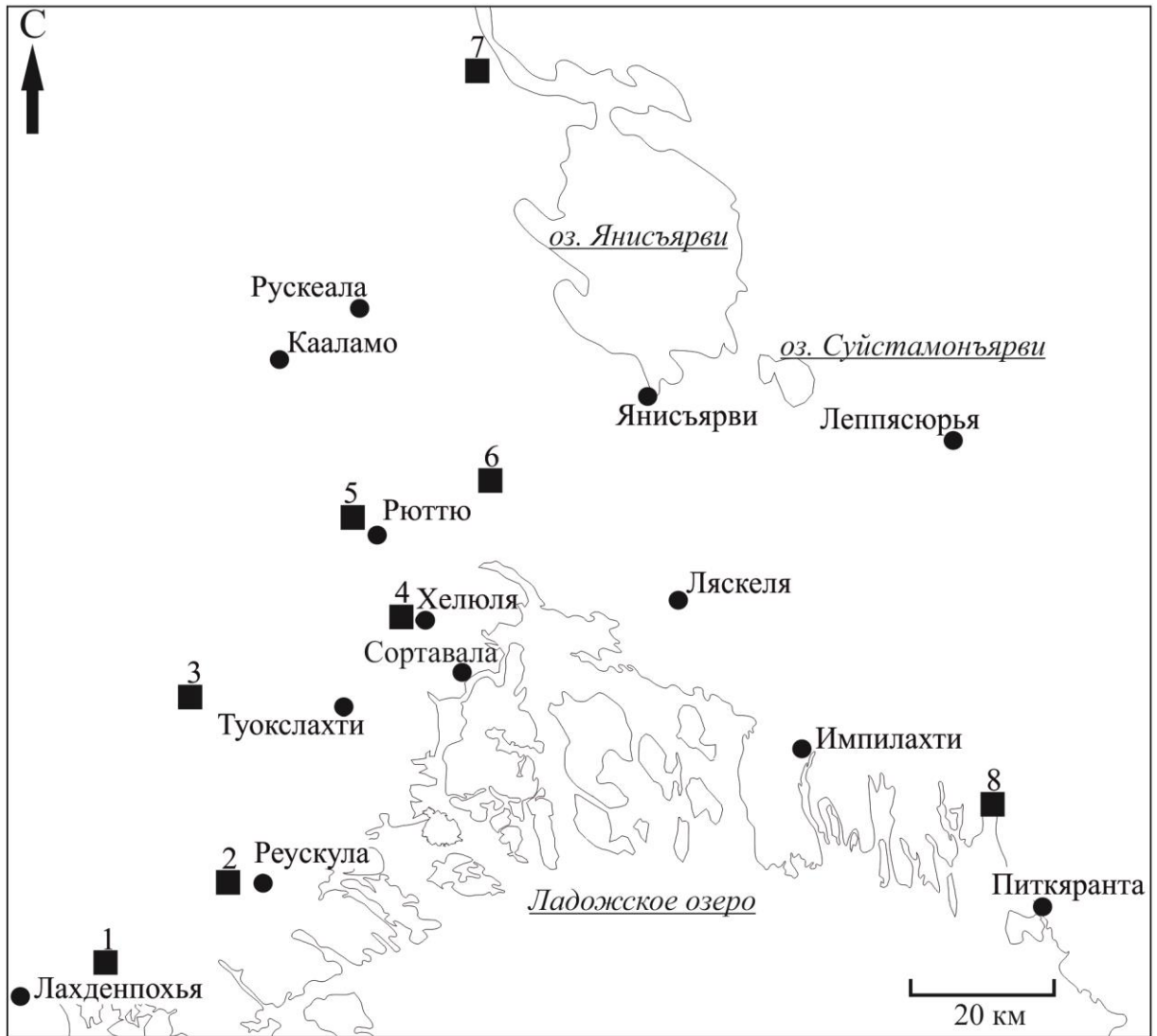


Рис. 2. Схема расположения точек наблюдения, в которых зафиксированы палеосейсмодислокации: 1 – точки наблюдения и их номера, по [Агибалов и др., 2018]

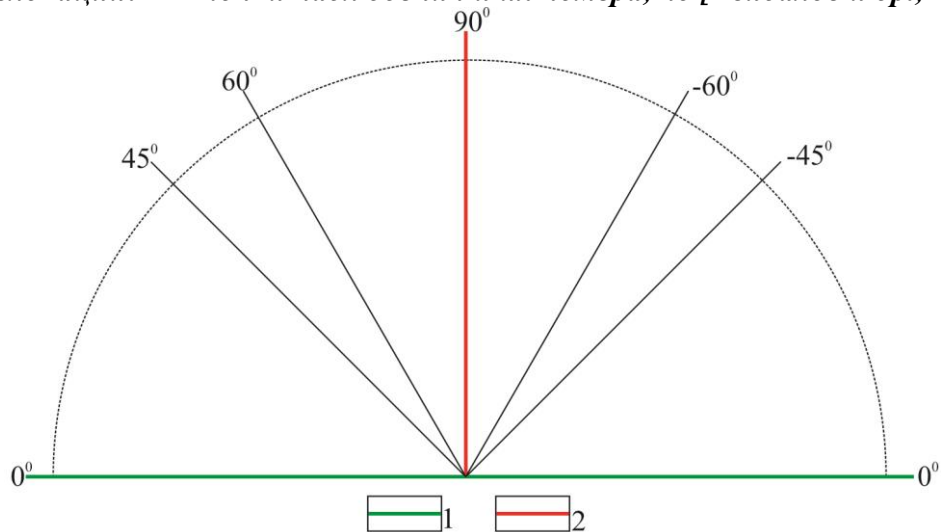


Рис. 3. Схема отсчета угла  $\beta$ , показывающего, каким образом борозды скольжения развернуты относительно линии простирания трещины: 1 – линия простирания трещины, 2 – линия падения

№ п/п	азимут падения лежащего крыла (в °)	угол падения (в °)	угол $\beta$ (в °)	кинемати ческий тип
1	160	60	-72	w
2	170	45	36	w
3	200	60	-72	w
4	180	45	-78	w
5	200	45	-78	w
6	165	50	-78	w
7	175	85	0	l
8	230	75	0	l
9	245	70	22	s
10	230	75	16	s
11	235	70	0	l
12	230	65	34	s
13	285	85	25	p
14	255	75	11	s
15	230	75	37	s
16	130	40	75	w
17	215	80	-11	l
18	185	85	0	l
19	305	75	53	w
20	315	75	0	p
21	300	75	53	w
22	100	60	-73	w
23	230	35	26	w
24	185	80	36	w
25	40	55	38	w
26	50	70	38	w
27	245	50	90	w
28	325	85	0	p
29	325	85	82	s
30	300	55	-45	w
31	40	40	64	w
32	270	15	0	p
33	250	25	0	p
34	305	65	-28	w
35	300	40	52	w
36	205	40	-75	w
37	340	25	90	s
38	350	50	-49	w
39	120	80	46	s
40	200	50	-41	s
41	240	65	-12	s
42	25	60	-11	w
43	30	70	5	w

Табл. 1. Замеры зеркал и борозд тектонического скольжения: латинскими буквами обозначены: w - взброс, s – сброс, p – правый сдвиг, l – левый сдвиг

№ п/п	азим ут падения лежащего крыла (в °)	угол падения (в °)	кинемати ческий тип	№ точки наблюдения
1	350	45	s	1
2	350	70	s	1
3	290	75	s	2
4	190	75	w	3
5	150	60	s	4
6	320	50	w	5
7	300	60	s	6
8	10	30	s	7
9	190	60	w	7
10	10	70	s	7
11	310	70	s	8
12	30	75	s	8

*Табл. 2. Замеры элементов залегания поверхностей сместителей разрывных нарушений, зафиксированных в рыхлых отложениях балтийского гляциолимния (поздний неоплейстоцен)*

Выполнение этого условия означает, что между направлением касательного напряжения на плоскости трещины и направлением произошедшего по ней смещения существует острый угол. Для того чтобы на количественном уровне оценить, в какой мере выполняются критерии, показывающие, насколько однороден процесс накопления необратимых деформаций в пространстве и времени, для каждого зеркала скольжения рассчитывается параметр Q. Главный из упомянутых критериев имеет вид:

$$d\varepsilon_{11}^k \geq d\varepsilon_{22}^k \geq d\varepsilon_{33}^k \text{ при } d\varepsilon_{11}^k + d\varepsilon_{22}^k + d\varepsilon_{33}^k = 0. \quad (1)$$

где  $d\varepsilon_{ii}^k$  – приращения деформаций вдоль главных нормальных осей напряжений  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ). Главное растягивающее напряжение обозначено как  $\sigma_1$ , промежуточное -  $\sigma_2$ , сжимающее -  $\sigma_3$ . Для расчета приращений необратимых деформаций достаточно данных о направляющих косинусах нормали к плоскости трещины  $n_i^k$  и смещения вдоль нее  $s_i^k$  с осями  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ):

$$d\varepsilon_{ii}^k = n_i^k s_i^k \quad (2)$$

Из критерия (2) следует, что

$$n_1^k s_1^k \geq n_2^k s_2^k \geq n_3^k s_3^k \quad (3)$$

Как было отмечено выше, для реализации принципа максимальной диссипации упругой энергии при минимальном количестве выделенных однородных выборок необходимо, чтобы между направлением касательного напряжения на плоскости трещины и направлением произошедшего по ней смещения существовал острый угол. Это условие можно записать в виде:

$$n_1^k s_1^k > 0, n_3^k s_3^k < 0. \quad (4)$$

Таким образом, при выполнении критериев (2) и (4)  $Q=7$ ; если выполнен только критерий (3),  $Q$  принимает целочисленные значения в интервале 4-6; если критерии (2) и (4) не выполнены,  $Q$  составляет 0-3. Зеркала скольжения, для которых  $Q < 0$ , не включаются в однородную выборку. В данной работе общее количество зеркал одной однородной выборки обозначено буквой  $N$ , индексом  $b$  обозначены зеркала, полностью удовлетворяющие критериям метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого (МКА) с  $Q=7$ , индексом  $s$  – частично удовлетворяющие данным критериям ( $4 \leq Q \leq 6$ ). Помимо ориентировок главных нормальных осей напряжений, программа STRESSgeol позволяет рассчитать ориентировки осей главных приращений деформаций [Ребецкий и др., 2017]. В ряде случаев выходы соответствующих осей напряжений и главных приращений деформаций совпадают. Более подробно положения метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) Ю.Л. Ребецкого, реализуемые программой STRESSgeol, рассмотрены в публикациях [Ребецкий, 2007; Ребецкий и др., 2009; Ребецкий и др., 2017]. Интерфейс и алгоритм программы STRESSgeol подробно описан в монографии [Ребецкий и др., 2017].

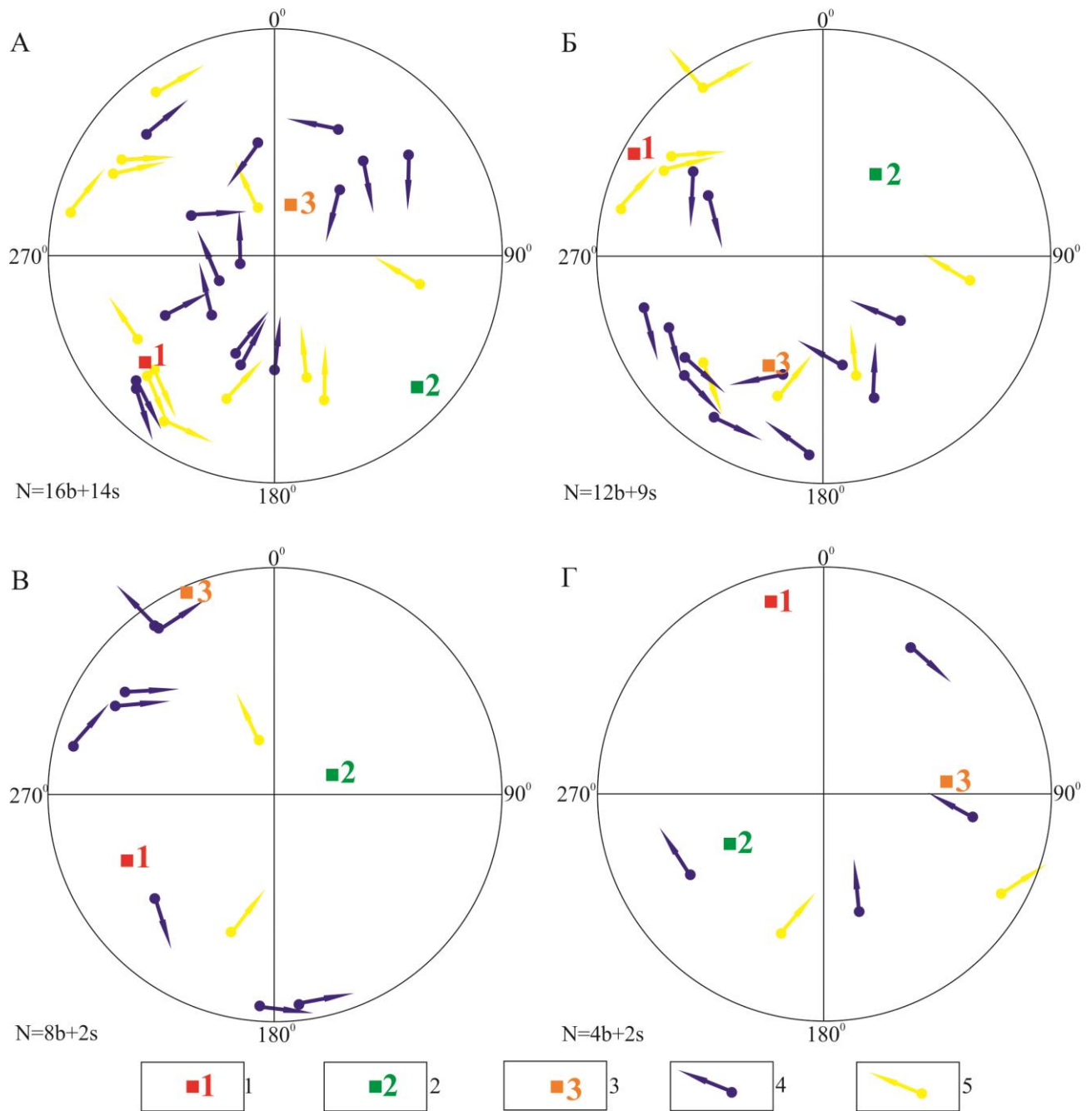
Другим методом реконструкции палеонапряжений по замерам зеркал и борозд скольжения является метод Гущенко - Анжелье, основы которого изложены в работах [Гущенко, 1973; Гущенко, 1979]. В ряде публикаций разработанные О.И. Гущенко и Ж. Анжелье методы описаны как самостоятельные [Ребецкий, 2015]. В связи с тем, что независимо проведенные О.И. Гущенко и Ж. Анжелье исследования, как отмечает П.Н. Николаев (1992), являются «практически идентичными», в данной работе используется название «метод Гущенко - Анжелье». Его физико-математической основой является доказанная Д.П. Маккензи в 1969 году причинно-следственная зависимость направлений сдвиговых перемещений в горных породах от направлений воздействующих на них главных нормальных напряжений [Васильев и др., 2012]. Для определения положений главных нормальных осей напряжений методом Гущенко – Анжелье применяется ряд графических приемов с использованием сетки Вульфа – Гущенко. Они заключаются в построении на стереограмме проекции поверхности зеркала, нанесении вектора перемещения по нему, построению кинематической плоскости, проходящей через вектор перемещения перпендикулярно плоскости зеркала. Главные нормальные оси сжатия и растяжения лежат в кинематической плоскости и ориентированы под углом  $45^0$  к вектору перемещения [Москаленко и др., 2015]. Квадранты сжатия и растяжения ограничены 2 плоскостями – плоскостью зеркала скольжения и плоскостью, проходящей через полюс к поверхности

зеркала и пересекающей плоскость зеркала. Аналогичные построения проводятся в автоматизированном режиме с помощью программы FaultKin, разработанной исследовательской группой под руководством Р. Алльмендингера [Allmendinger et al., 1989]. Достоинством этой программы является то, что при обработке нескольких замеров она позволяет реконструировать положение «квазиглавных» нормальных осей (по терминологии В.Д. Парфенова (1982)), т. е. осредненное положение главных нормальных осей напряжений. В связи с тем, что в программе FaultKin отсутствуют ограничения на объединение зеркал в одну выборку [Москаленко и др., 2015], все зеркала скольжения были предварительно разделены на несколько групп с помощью программы STRESSgeol. В программе FaultKin проведен анализ только тех зеркал, которым в ходе первой итерации был присвоен индекс b. Результаты улучшения качества определения напряженных состояний в ходе последующих итераций не рассмотрены в данной работе, поскольку ориентировки главных нормальных напряжений для одних и тех же кинематических групп в ходе итерационного цикла расчета принципиально не изменялись.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

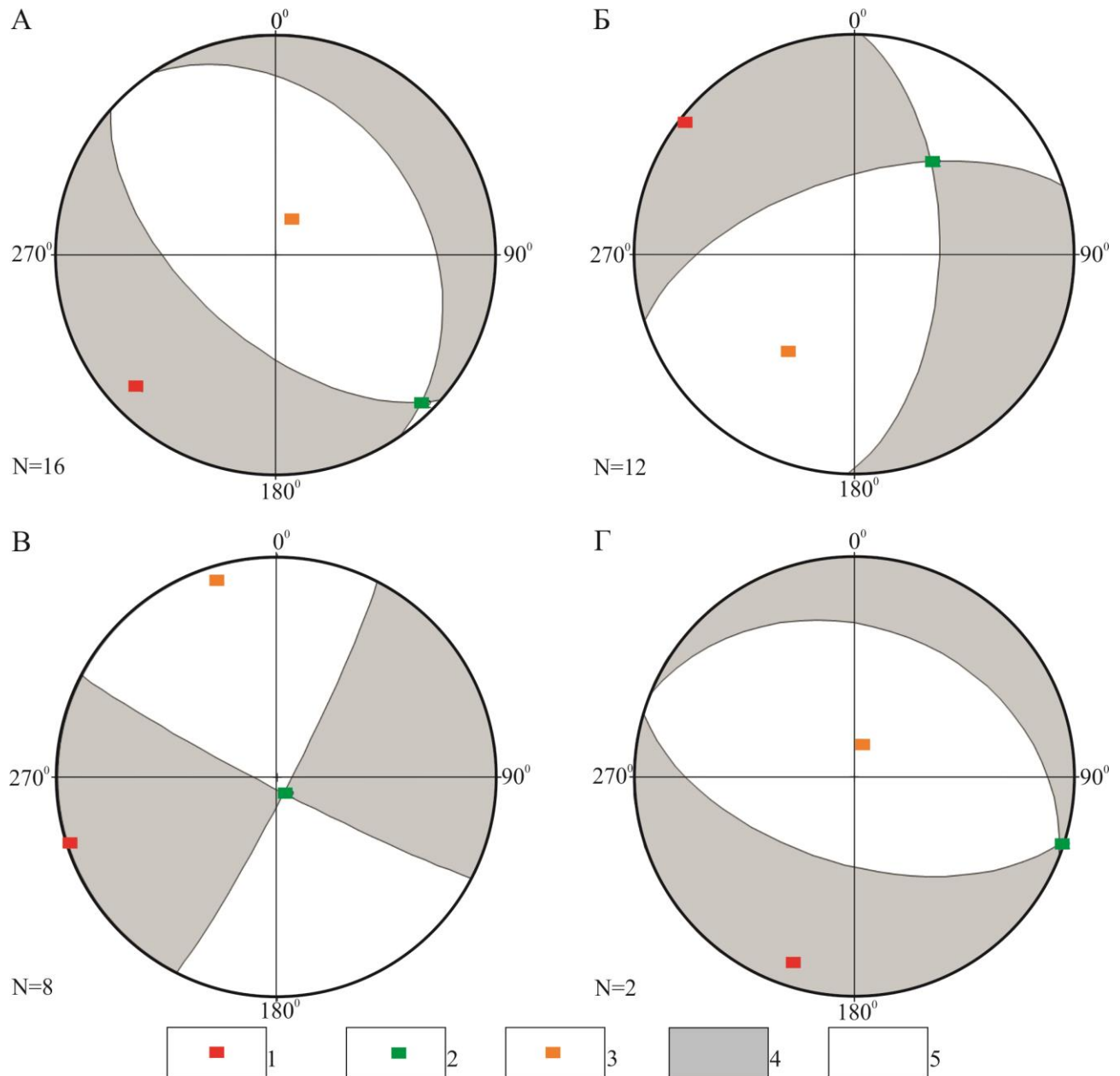
Автоматизированная обработка замеров зеркал и борозд скольжения с помощью программы STRESSgeol показала, что в результате начальной (первой) итерации выделяются 4 однородные выборки. Первые две выборки (А и Б) включают 16b+14s и 12b+9s зеркал, соответственно. Две другие выборки (В и Г), состоящие из 8b+2s и 4b+2s зеркал, исключены из рассмотрения как недостаточно представительные. Обработка с помощью программы FaultKin замеров зеркал, полностью удовлетворяющих критериям МКА ( $Q=7$ ), позволяет сделать вывод о том, что реконструированные двумя разными методами положения осей  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) принципиально не отличаются друг от друга (рис. 4, 5).

Выборке А соответствует взбросовый тип напряженного состояния, при котором ось сжатия ориентирована в северо-восточном направлении. По мнению авторов данной работы, данный тип напряженного состояния соответствует обстановке северо-восточного сжатия, проявившейся на ранних стадиях карельского тектогенеза. В это время на территории Северного Приладожья происходило формирование надвигов и изоклинальных складок с осевыми поверхностями северо-западного простирания, сопровождавшееся региональным метаморфизмом [Геология Карелии, 1987]. Выборке Б соответствует обстановка субгоризонтального северо-западного сжатия. Данный тип напряженного состояния проявляется в юго-восточной части Балтийского щита на новейшем этапе [Зыков, Полещук, 2016; Keiding et al, 2015].



**Рис. 4.** Положения главных нормальных осей напряжений, рассчитанные с помощью разработанной Ю.Л. Ребецким программы STRESSgeol (верхняя полуфера): 1-3 выходы главных нормальных осей напряжений: 1 – сжатия, 2 – промежуточной, 3 – растяжения; 4-5 – направления смещения по трещинам, построенные в их полюсах: 4 – направления смещения по трещинам, полностью удовлетворяющим критериям МКА, 5 – частично удовлетворяющим; N – общее количество зеркал, b – зеркала, полностью удовлетворяющие критериям МКА, s – зеркала, частично удовлетворяющие критериям МКА (пояснения в тексте)



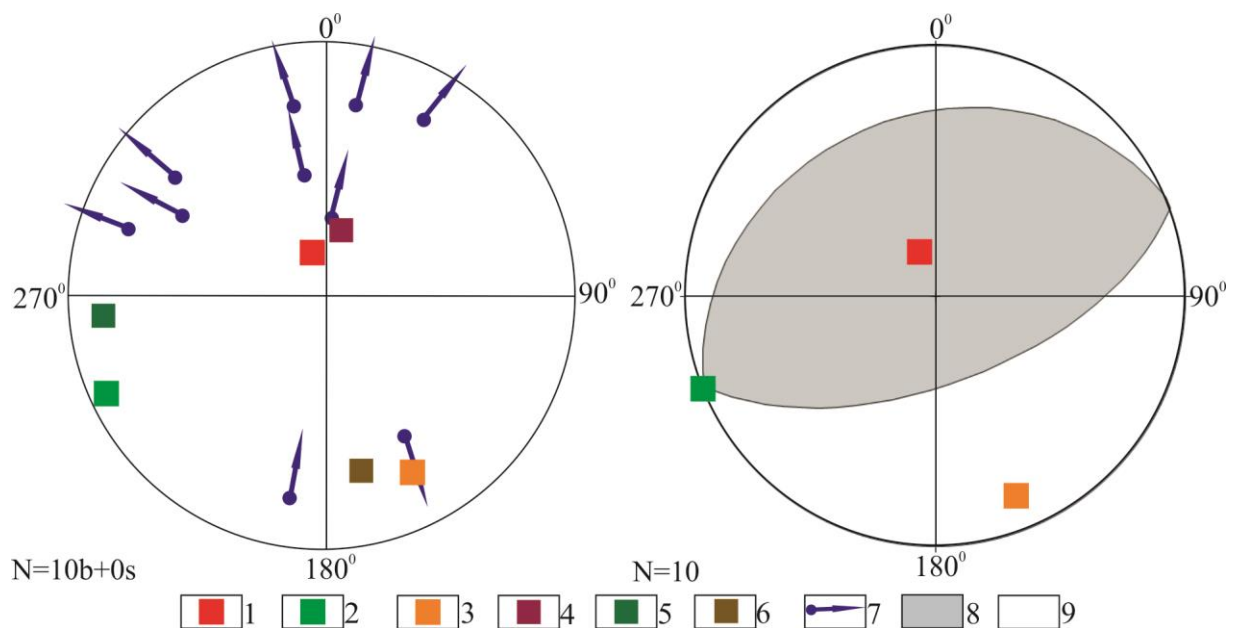


**Рис. 5.** Положения главных нормальных осей напряжений, определенные с помощью программы «FaultKin», разработанной Р. Альмендингером и его коллегами (верхняя полусфера): 1-3 - выходы главных нормальных осей напряжений: 1 – сжатия, 2 – промежуточной, 3 – растяжения; 4 – область сжатия, 5 – область растяжения; N – количество зеркал

Таким образом, интерпретация замеров зеркал и борозд скольжения предполагает, что они отражают 2 крупных деформационных этапа: 1) докембрийский, приуроченный по времени к наиболее интенсивным деформационно-метаморфическим преобразованиям, и 2) новейший, в течение которого происходит фрагментарная активизация древнего структурного плана.

В ходе обработки 12 замеров элементов залегания малоамплитудных разрывов с помощью программы STRESSgeol было установлено, что 10 разрывов относятся к

однородной выборке. Этот факт является одним из аргументов, подтверждающих обоснованность интерпретации изученных структур как палеосейсмодислокаций: в том случае, если их формирование обусловлено экзогенными процессами, разрывы были бы ориентированы неупорядоченно и не могли быть объединены в одну кинематическую группу. Определенный с помощью программ STRESSgeol и FaultKin тип напряженного состояния мог проявиться на стадии новейшей активизации Ладожского грабена, происходящей, судя по данным ранее проведенного авторами компьютерного и физического моделирования на эквивалентных материалах, в обстановке субгоризонтального северо-восточного растяжения (рис. 6).



**Рис. 6.** Положения главных нормальных осей напряжений, рассчитанные с помощью разработанной Ю.Л. Ребецким программы STRESSgeol (слева) и программы FaultKin, разработанной Р. Алльмендингером (справа) (верхняя полусфера): 1-3 выходы главных нормальных осей напряжений: 1 – сжатия, 2 – промежуточной, 3 – растяжения; 4-6 выходы осей приращений необратимых деформаций: 4 – сжатия, 5 – промежуточной, 6 – растяжения; 7 - направления смещения по трещинам с  $Q=7$ , построенные в их полюсах; 8 – область сжатия (на правом рисунке), 9 – область растяжения (на правом рисунке)

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенной реконструкции положения главных нормальных осей напряжений по замерам зеркал и борозд скольжения не противоречат ранее выдвинутому предположению о том, что в новейшее время большая часть территории Северного Приладожья испытывает северо-западное сжатие, связанное со спредингом в северной части Атлантического океана и гляциоизостатическим поднятием Балтийского щита. Установленная принадлежность 10 из 12 замеров элементов залегания разрывных

нарушений, проявленных в рыхлых четвертичных отложениях, к одной однородной выборке, является аргументом в пользу того, что они не являются результатом экзогенных процессов, а возникли при сейсмических событиях. Последние могли быть связаны с активизацией Ладожского грабена, происходящей при северо-восточном растяжении.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией тектонофизики им. М.В. Гзовского ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, доктору физико-математических наук Ю.Л. Ребецкому за предоставленную возможность использования программы STRESSgeol.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Агибалов А.О., Сенцов А.А., Бардышев Г.П., Зайцев В.А.* Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор новейшей сейсмоструктурной активности территории // Материалы всероссийской научной конференции "Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология». М.: Перо, 2018. С. 38-56.

*Васильев Н.Ю., Мострюков А.О., Сунцов В.А.* Условия тектонического нагружения и прогноз перспективных участков месторождения Таловейс // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2012. №15. С 77-93.

Геология Карелии. Л.: Наука, 1987. 231 с.

*Гущенко О.И.* Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // ДАН СССР. 1973. Т. 210. №2. С. 331-334.

*Гущенко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформации в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7-25.

*Зыков Д.С., Полещук А.В.* Взаимодействие геодинамических систем на Восточно-Европейской платформе в новейшее время // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 1. С. 3-14.

*Москаленко А.Н., Худoley А.К., Жуков В.В., Демин В.Ю., Верин А.В.* Реконструкция кинематических характеристик разрывных нарушений и поля палеонапряжений для Урмано – Ачинской площади (Нюрольская впадина) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10. №2. С. 1-16.

*Николаев П.Н.* Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.

*Парфенов В.Д.* К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. №1. С. 60-72.

*Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.

*Ребецкий Ю.Л.* Тектонофизические методы изучения природных напряжений по сейсмологическим данным // Современная тектонофизика. Материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 2015. Т. 2. С. 3-42.

*Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Сычева Н.А.* Метод катакластического анализа разрывных нарушений и результаты расчетов современного напряженного состояния в коре вблизи границ плит и для внутриплитных горно-складчатых орогенов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции, г. Москва, 13-17 октября 2008 г. М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 340-366.

*Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.

*Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D.* Structural geology algorithms: Vectors & Tensors. Cambridge: Cambridge University Press. 2012. 302 p.

*Keiding M., Kreemer C., Lindholm C.D., Gradmann S., Olesen O., Kierulf H. P.* A comparison of strain rates and seismicity for Fennoscandia: depth dependency of deformation from glacial isostatic adjustment // Geophys. J. Int., 2015. V. 202 P. 1021 – 1028.