

УДК 551.462.8

ПРИРОДА ЗАМКНУТЫХ ДЕПРЕССИЙ НА ВОСТОЧНОМ СКЛОНЕ ОСТРОВА САХАЛИН

© 2013 Б.В. Баранов¹, Д.Д. Рукавишников¹, В.Г. Прокудин², Я.-К. Джин³, К.А. Дозорова¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997;
e-mail: bbaranov@ocean.ru

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, 690041

³Корейский Институт Полярных Исследований, Инчон, 406-840, 213-3 Сонгдо-Донг, Йонсу-гу, Корея

В статье представлены оригинальные данные, полученные при батиметрических и сейсмических исследованиях центральной части восточного склона о. Сахалин в рамках двух международных проектов. В этом районе были закартированы замкнутые депрессии, которые не являются покмарками, возникающими на морском дне за счет выброса газа из осадочной толщи, как предполагалось ранее. Образование этих структур связано с проседанием осадков вдоль системы современных разломов. Разломы представлены субмеридиональными сдвигами и сопряженными с ними сбросами и взбросами.

Ключевые слова: восточный склон Сахалина; замкнутые депрессии, осадочный чехол, разломы.

ВВЕДЕНИЕ

Восточный склон Сахалина, за исключением его сегмента, прилегающего к Курильской котловине, имеет достаточно простой рельеф. Наиболее примечательной чертой морфологии склона является прогиб, ориентированный в северо-восточном направлении, и располагающийся в центральной части склона. На склонах прогиба по материалам батиметрической съемки многолучевым эхолотом выявлено несколько изометричных депрессий размерами сотни метров – первые километры (глубиной 50–250 м). Ранее предполагалось (Baranov et al., 2008), что данные структуры являются гигантскими покмарками, образовавшимися в результате эпизодического выброса газа, главным образом метана, из осадков в соответствии с моделью, предложенной в работе (Novland, Judd, 1988).

В 2011–2012 гг. в рамках международного проекта ГГСС (ГазоГидраты Сахалинского Склона) в этом районе были проведены дополнительные батиметрические и сейсмоакустические исследования и опробование осадков (Operation..., 2010; 2011). Новые данные свидетельствуют, что образование депрессий не было связано с выделением газа из осадочной толщи. В настоящей работе

приводится описание этих структур, показана их связь с активными разломами и делается вывод об их тектонической природе.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Восточный склон о. Сахалин граничит с разными структурными элементами дна Охотского моря, а именно: Курильской задуговой котловиной, возвышенностями Академии Наук и Института океанологии, котловиной Дерюгина и трогом Старицкого (рис. 1). Рельеф склона достаточно простой и однотипный. Однако при рассмотрении различных широтных батиметрических профилей наблюдаются изменения высоты склона, его ширины, формы и, соответственно, углов наклона. Это дало основание для выделения отчетливо разграничивающихся сегментов склона (Баранов и др., 2011). Район исследований расположен в центральной части восточного склона о. Сахалин (рис. 1) и приурочен к одной из таких границ, которая выражена в рельефе дна прогибом, упомянутым во Введении.

В рельефе склона прогиб начинает проявляться с изобаты 800 м и прослеживается до глубины более 1500 м. На мелкомасштабной карте он выглядит как грабенообразная струк-

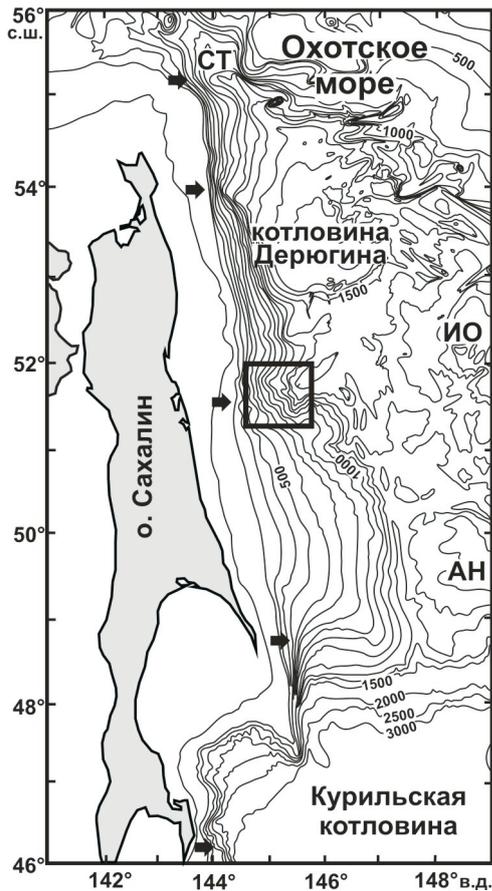


Рис. 1. Батиметрическая карта восточного склона о. Сахалин по (Сваричевский, 2001) и положение района исследований (прямоугольник). Стрелками обозначены границы сегментов по (Баранов и др., 2011). Изобаты проведены через 100 м, для склона Курильской котловины – через 500 м. АН – возвышенность Академии наук, ИО – возвышенность Института океанологии; СТ – трог Старицкого.

тура, юго-восточный борт которой круче северо-западного (рис. 1).

В рельефе фундамента, в пределах рассматриваемого района, выделяются несколько поднятий, разделенных прогибами с мощностью осадков до 8-9 км. Прогибы ориентированы в северо-восточном и северо-западном направлениях и ограничены разломами аналогичного простирания. На генеральной схеме этот район является границей между двумя крупными осадочными бассейнами: Северо-Сахалинским и Пограничным (Харахинов, 2010).

ДАННЫЕ

В статье использованы материалы, полученные в морских экспедициях при изучении восточного склона о. Сахалин в рамках российско-германского проекта КОМЭКС (Журило-Охотский Морской Эксперимент, 1998-2004 гг.) и корейско-российско-японского проекта ГГСС (ГазоГидраты Сахалинского Склона, 2007-2015 гг.).

В исследуемом районе батиметрическая съемка проводилась эхолотами двух типов: эхолотом ELAC LAZ-72 E-V с частотой 12 кГц (Operation..., 2011; 2012) и многолучевым эхолотом «СИМРАД EM 120» с диапазоном измерений от 10 до 10000 метров и частотой 12 кГц (Cruise..., 2004).

Для описания строения осадочного чехла были использованы данные, полученные системами одноканального и многоканального сейсмического профилирования. При сейсмоакустических исследованиях в одноканальном варианте в качестве источника упругой энергии использовался электроискровой излучатель «Соник 4М» (4000 джоулей). Регистрация осуществлялась в полосе частот 200-1500 Гц. Проникновение в осадочный чехол составляло до 500 мС двойного времени распространения сигнала (Operation..., 2011; 2012).

При многоканальных сейсмических исследованиях использовались пневмоисточники: групповой, с преобладающей частотой 70-90 Гц и общим объемом 6.88 л, и мини-пушка с преобладающей частотой 80-170 Гц и объемом 1.04 л. Регистрация осуществлялась 8-канальной сейсмокозой производства компании GECO Prakla. Проникновение в осадочный чехол составляло до 2 с двойного времени распространения сигнала (Wong et al., 2003)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рельеф района исследований

Первые детальные данные о рельефе района были получены при батиметрической съемке многолучевым эхолотом на нис «Зонне» (рейс SO-178, август 2004 г.) (Cruise..., 2004). В дальнейшем здесь была выполнена съемка однолучевым эхолотом на нис «Академик М.А. Лаврентьев» (50-ый рейс, август 2010 г. и 56-ой рейс, август 2011 г.) (Operation..., 2011; 2012). В результате проведенной съемки в прогибе и на его склонах был выявлен ряд ранее неизвестных морфологических элементов.

Согласно полученным данным, прогиб в качестве единой структуры проявляется в рельефе только ниже изобаты 1350-1375 м. Выше по склону он распадается на несколько изолированных депрессий, которые выстраиваются в цепочки, ориентированные в северо-восточном или субмеридиональном направлениях (рис. 2). Северо-восточная цепочка депрессий прослеживается в интервале глубин 900-1300 м в северо-западной части района исследований. Глубина депрессий достигает до 250 м, а размеры по длинной оси составляют более 5 км. Они имеют асимметричный профиль и различную геометрию бортов: северный склон представлен

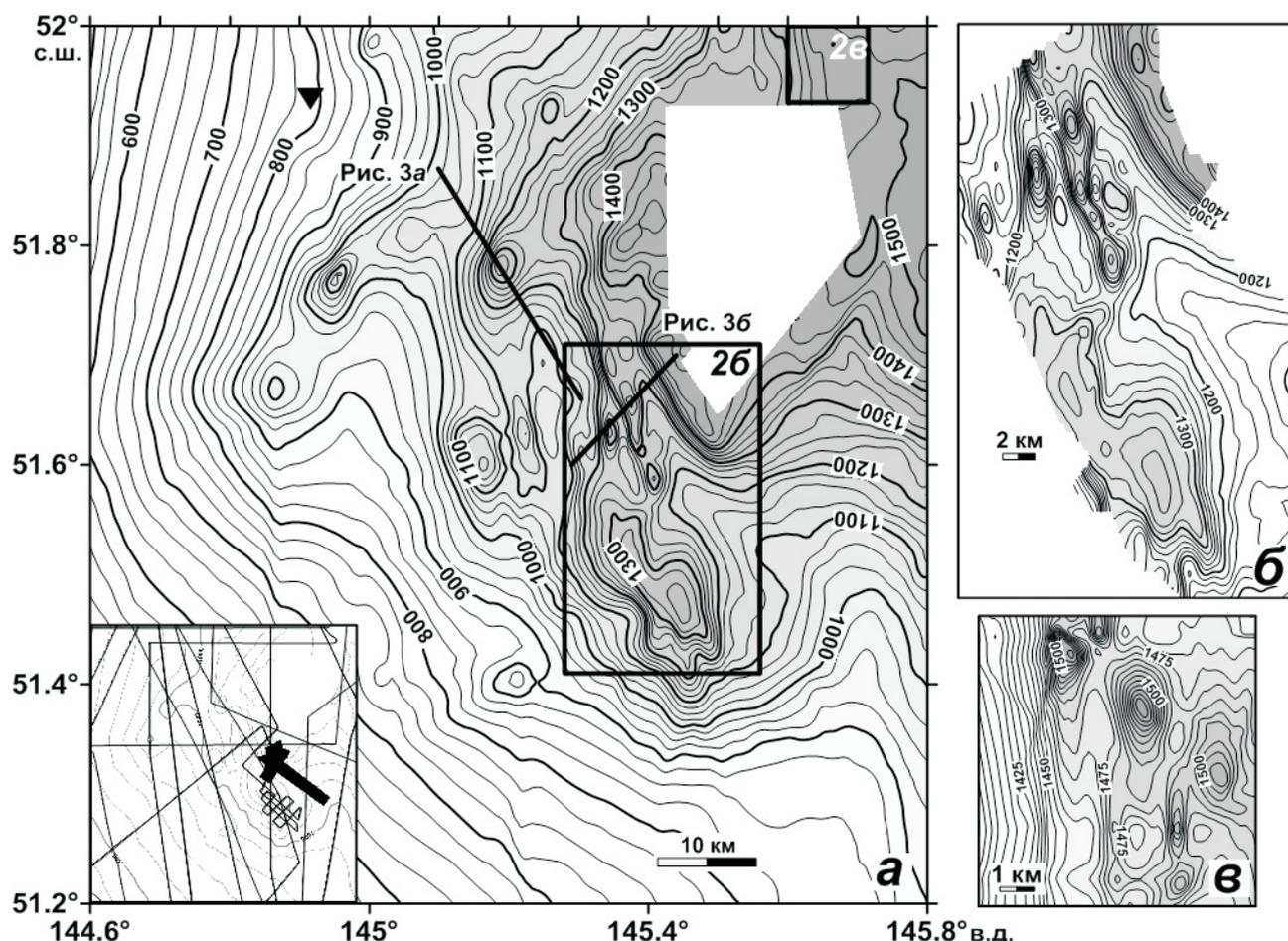


Рис. 2. Батиметрическая карта района исследований (а), детальная карта участка юго-западного замыкания прогиба, съемка многолучевым и обычным эхолотами (б) и карта северного участка ложа прогиба, съемка обычным эхолотом (в). Сечение изобат – 25, 20 и 5 м, соответственно. Залитый треугольник обозначает газовый факел, жирными линиями показано положение батиметрических профилей, приведенных на рис. 3. Галсы батиметрической съемки обычным эхолотом и площадь, отснятая многолучевым эхолотом, приведены на врезке рис 2а; съемка в пределах белого поля не проводилась. Положение района исследований показано на рис. 1.

одной ступенью, а южный состоит из двух-трех ступенек, разделенных уступами высотой в несколько десятков метров (рис. 3а).

Более детальные представления о рельефе были получены для депрессий, которые выстраиваются в цепочки субмеридионального простираения, поскольку именно на этих структурах была выполнена съемка многолучевым эхолотом и регулярная съемка обычным эхолотом (рис. 2б). Первая из этих цепочек располагается вдоль юго-западного замыкания прогиба, где депрессии приурочены к максимальным глубинам района, равным 1540 м. Следующая расположена выше по склону на глубинах 1200-1300 м. Депрессии имеют округлые или слегка вытянутые в субмеридиональном направлении очертания. Углы наклона их стенок достигают 7-10°, а размеры колеблются от 600 м до 10 км по длинной оси при глубине от 20 м до 200 м. В отличие от северо-восточных депрессий, у депрессий субмеридионального простираения

оба борта крутые и профиль имеет U-образную форму (рис. 3б).

На севере депрессии открываются в прогиб, на юге они заканчиваются самой крупной депрессией, размеры которой превышают 10 км в поперечнике при глубине более 250 м. Эта депрессия имеет примечательную морфологию, так как ее северный борт является достаточно пологим (около 7°), а южный – ограничен крутым (25-30°) извилистым уступом высотой до 100 м (рис. 2б).

В центральной части прогиба батиметрическая съемка не проводилась, и данные о морфологии его рельефа отсутствуют. Результаты съемки позволяют получить представление только о небольшом участке, расположенном на севере прогиба в интервале глубин 1400-1475 м (рис. 2в). В западной части участка находится склон прогиба, простирающийся в субмеридиональном направлении. Восточная часть участка принадлежит к прогибу, где выделяется

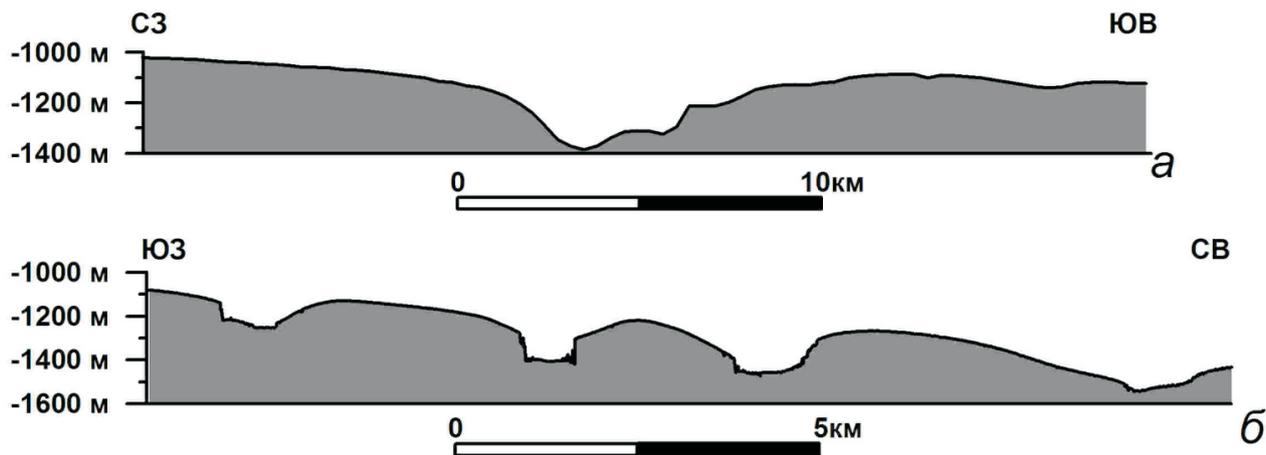


Рис. 3. Характерные батиметрические профили депрессий северо-восточного (а) и субмеридионального (б) простираний. Положение профилей показано на рис.2а.

несколько отделенных друг от друга изометричных немного вытянутых в субмеридиональном направлении депрессий. Их размеры достигают 2 км в поперечнике при глубине до 50 м; три наиболее крупных депрессии смещены относительно друг друга по часовой стрелке.

Таким образом, примечательным элементом морфологии склонов и дна прогиба является наличие гигантских овальных депрессий, которые выстраиваются в цепочки субмеридионального и северо-восточного простирания. Размеры депрессий колеблются от нескольких сот метров до 10 км, а глубина изменяется от 20 м до 250 м.

Строение осадочного чехла

На сейсмических разрезах, полученных в этом районе, фиксируются многочисленные отражающие горизонты, свидетельствующие о слоистой структуре осадочной толщи (рис. 4). При глубине моря большей 1200 м слоистое строение осадочной толщи на сейсмоакустических разрезах видно до 400 мС ниже дна, что соответствует 340 м при скорости сейсмических волн в верхней части осадочного чехла, равной 1700 м/с (рис. 4, профиль LV56-03 и профиль LV56-27). На глубинах дна меньших 1200 м в осадочном разрезе на временах 200-220 мС (около 180 м) появляется высокоамплитудный рефлекс, экранирующий более глубокие границы.

На сейсмическом разрезе, полученном с пневмоисточником (рис. 4, профиль SE-02), освещенная часть осадочного чехла равна 1.2 с (или около 1 км). На этом разрезе наблюдается чередование многочисленных низко- и высокоамплитудных отражающих горизонтов. Первый из отражающих горизонтов с высокой амплитудой на этом профиле соответствует высокоамплитудному рефлексору, выделяемому на сейсмоакустических профилях, ниже которого

высокочастотные отражения не зарегистрированы.

Наблюдаемый характер сейсмического разреза меняется только в пределах самой южной из депрессий, пересекаемой сейсмическим профилем LV56-03 (рис. 4). Здесь выделяется осадочное тело, кровля которого местами имеет холмистую поверхность, а подошва, соответствующая высокоамплитудному отражающему горизонту, срезает нижележащие рефлексоры. Само тело является акустически прозрачным, и в разрезе имеет форму клина, мощность которого увеличивается с юга на север.

Разрывные нарушения и их кинематика

Разрывные нарушения, которые секут всю видимую часть осадочной толщи, широко распространены в пределах рассматриваемого района. В большинстве случаев разломы выходят на дно, формируя в рельефе уступы или депрессии, что свидетельствует об их современной активности. Совместный анализ батиметрических карт и сейсмических разрезов дал возможность выделить следующие типы разрывных нарушений: сбросы, сдвиги и взбросы (рис. 4, 5 и 6).

Сбросы располагаются на юго-западном склоне прогиба, его северо-западном и юго-восточном бортах и в пределах самого прогиба (рис. 5а). На юго-западном склоне прогиба, по имеющимся данным, можно выделить два крупных сброса. Первый из них имеет северо-восточное простирание и приурочен к депрессиям, которые, как отмечалось выше, характеризуются асимметричным профилем. По сейсмическим данным северный борт этих депрессий соответствует единичному сбросовому уступу, тогда как южный борт состоит из нескольких сбросовых уступов. Подобного рода асимметрия является характерной для листрических сбросов.

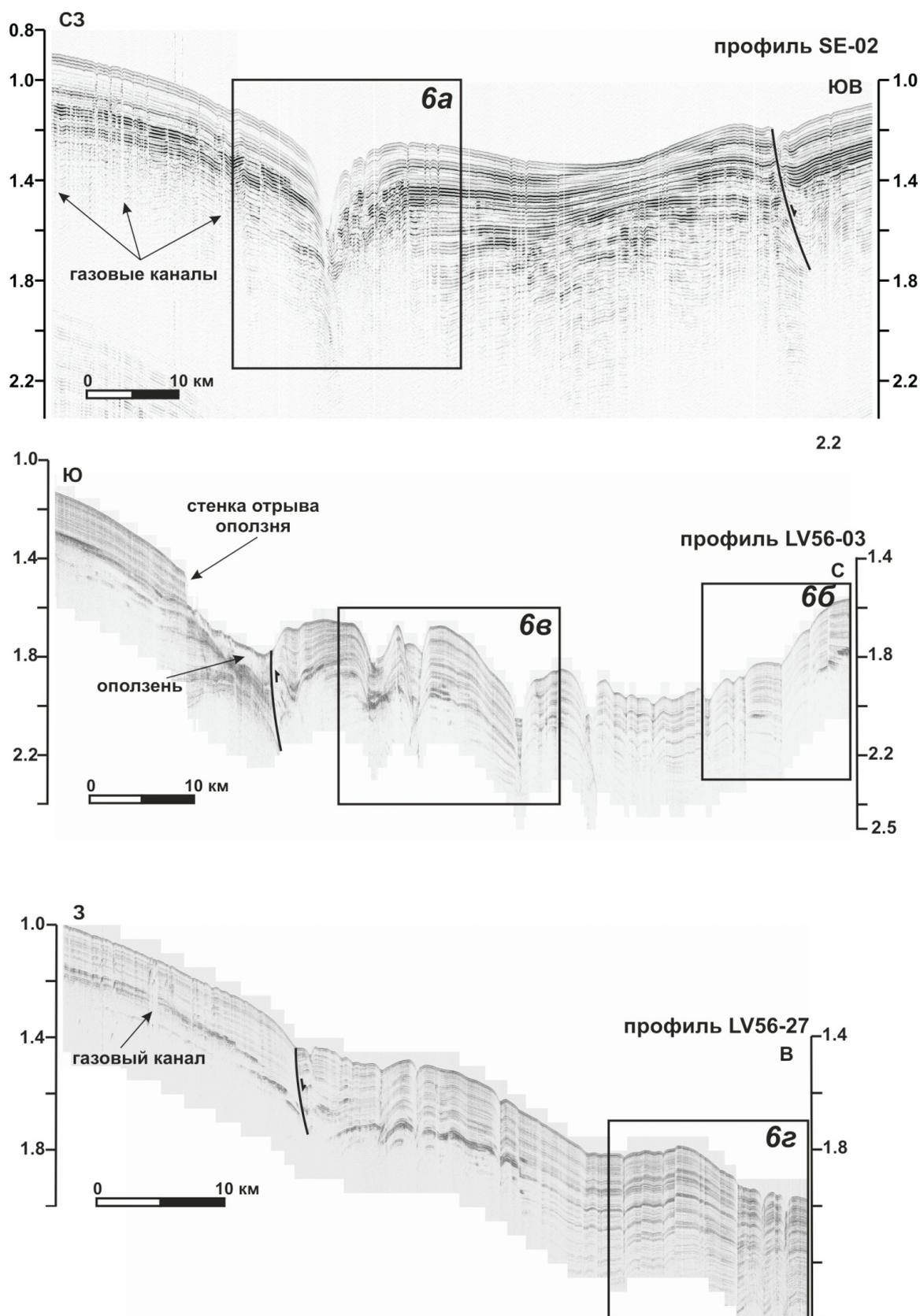


Рис. 4. Сейсмические разрезы, иллюстрирующие строение осадочного чехла прогиба с наличием многочисленных разрывных нарушений. Вертикальная шкала – двойное время распространения сигнала в секундах. Сейсмический профиль SE-02 был получен в 32-м рейсе нис «Профессор Гагаринский» (проект КО-МЭКС), остальные профили – в 56-м рейсе нис «Академик Лаврентьев» (проект ГГСС). Прямоугольниками отмечены участки профилей, интерпретация которых приведена на рис. 6. Положение профилей показано на рис.5а. См. текст для дальнейших пояснений.

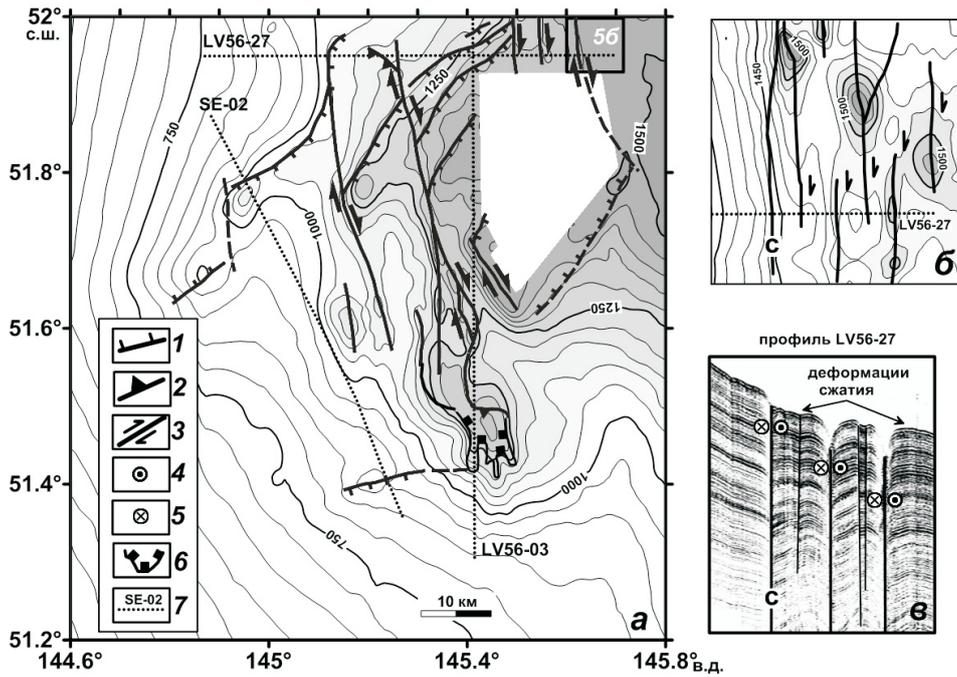


Рис. 5. Схемы разломов для всего района исследований (а), северного участка прогиба (б) и отрезков сейсмического профиля LV56-27, иллюстрирующий различие между западным и восточным бортами одного из сдвигов (в): 1 – сбросы, 2 – взбросы, 3 – сдвиги (пунктиром показаны предполагаемые разломы), 4-5 – смещения крыльев сдвига к наблюдателю (4) и от него (5), 6 – стенка отрыва оползня, 7 – сейсмические профили и их номера. С – сдвиг при пересечении которого меняется характер деформаций.

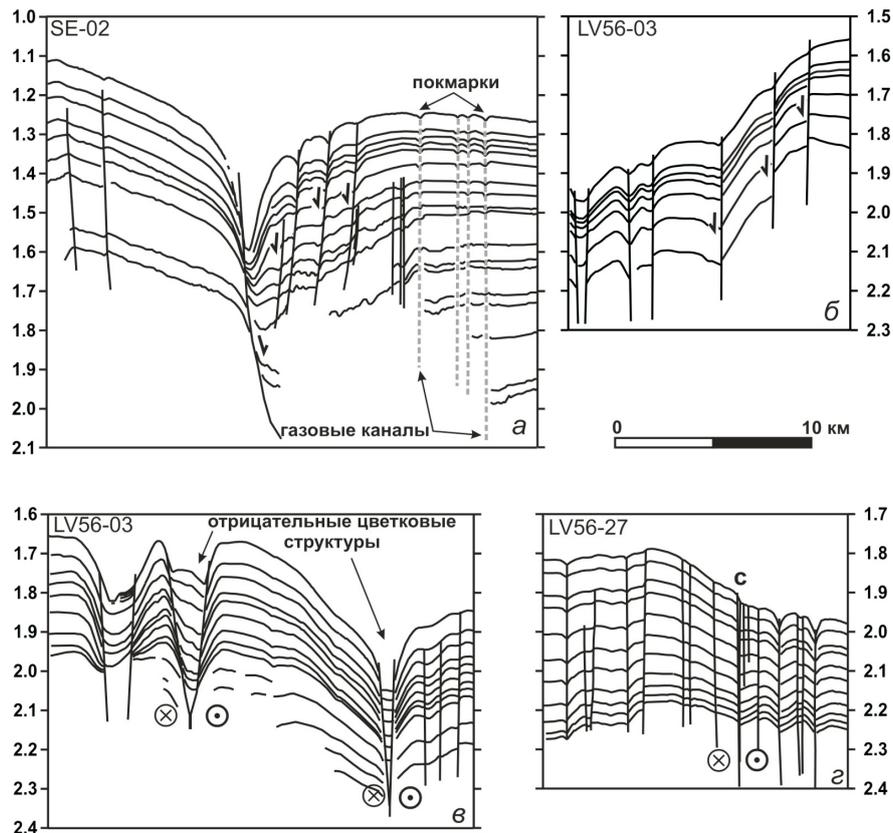


Рис. 6. Интерпретированные участки сейсмических профилей, иллюстрирующие разломы различного типа: листрический сброс (а), сброс в правой части профиля и деформации сжатия в его левой части (б), цветковые структуры над сдвигом (в) и сдвиги с компонентой растяжения и сжатия (левая и правая части профиля, соответственно) (г). Вертикальная шкала - двойное время распространения сигнала в сундах. Условные обозначения и сокращения приведены на рис. 5. Положение профилей показано на рис. 4. См. текст для дальнейшего пояснения.

сов (Twiss, Moores, 1992) и можно полагать, что в данном случае листрическая плоскость разлома падает на юг, и в его висячем крыле образуются антитетические сбросы, как это показано на рис. 6а. На восток от профиля SE-02 разлом остается асимметричным до северо-западного борта прогиба (рис. 3а). В тоже время к западу от профиля SE-02, плоскость разлома падает на север, и антитетические сбросы в его висячем крыле отсутствуют. Это может свидетельствовать о том, что с востока на запад амплитуда растяжения уменьшается.

Второй сброс имеет субширотное простирание и располагается в южной части района, где в рельефе дна ему соответствует замкнутая депрессия (рис. 5а). Плоскость разрыва падает на юг, амплитуда смещения по ней является небольшой и, поэтому, антитетические сбросы в висячем крыле не образуются (рис. 4, юго-восточная часть профиля SE-02). На возможном восточном продолжении сброса находится крутой уступ высотой около 100 м, который, как отмечалось ранее, соответствует южному борту самой крупной депрессии (рис. 4, профиль LV56-03). Уступ обращен на север, он прослеживается на расстояние около 20 км и имеет извилистые очертания, изменяя свое простирание от субширотного до субмеридионального (рис. 5а). Под уступом на сейсмическом разрезе наблюдается акустически прозрачное осадочное тело, которое было проинтерпретировано в качестве оползня, а сам уступ рассматривался не как плоскость разлома, а как стенка отрыва оползня (Баранов и др., 2013). Возможно, что образование оползня было инициировано смещениями на этом разломе, но остается неясным, продолжается ли разлом к востоку от оползня, где сейсмические данные отсутствуют, а батиметрическая съемка многолучевым эхолотом не обнаружила его проявления в рельефе дна.

Сбросы, наблюдаемые на северо-западном борту прогиба, имеют северо-восточное – северо-северо-восточное простирание и другой морфологический облик. В рельефе дна им соответствуют небольшие уступы, а на сейсмических разрезах – крутые плоскости смещения. Величина смещения поверхности дна и отдельных отражающих горизонтов по вертикали не превышает 20 м (рис. 6б). Сейсмические данные по строению юго-восточного борта прогиба отсутствуют, однако в рельефе дна здесь выделяется крутой уступ высотой около 70 м, который может соответствовать плоскости сброса (рис. 5а).

Вторая система разломов в рельефе дна выражена цепочками депрессий субмеридионального простирания, которые прослеживаются вдоль юго-западного замыкания прогиба. На профиле LV56-03 (рис. 4 и 6в) видно, что депрессии об-

разуются за счет опускания осадочного чехла по двум падающим навстречу друг другу сбросам, которые соединяются на глубине около 400 м ниже поверхности дна. Подобного рода взаимоотношения могут рассматриваться в качестве отрицательных «цветковых структур» (negative flower structure), возникающих над зонами сдвига (Harding, 1985). Эти структуры образуются, когда на сдвигах в результате небольших изменений в их простирании возникает компонента растяжения. Поскольку размеры депрессий увеличиваются с севера на юг, то можно предположить, что в этом же направлении увеличивается компонента растяжения.

Для системы сдвиговых разломов довольно часто наблюдается структурный рисунок, состоящий из ветвящихся сингенетических разломов (anastomosing contemporaneous faults). Вследствие этого условия сжатия и растяжения при небольших изменениях простирания сдвиговых разломов или их кулисном строении могут постоянно перемежаться друг с другом вдоль единой, но имеющей комплексное строение, сдвиговой зоны, приводя к возникновению, соответственно, условий растяжения и сжатия (Twiss, Moores, 1992).

Подобного рода примером может являться система сдвигов, которая выделяется на окончании северо-западного борта прогиба, где его северо-восточное простирание резко меняется на субмеридиональное (рис. 2а). Наличие сдвиговой составляющей предполагается на основании субмеридионального простирания разломов и по резкому изменению структуры осадочного чехла при пересечении одного из них. На разрезе профиля LV56-27 (рис. 5в) видно, что осадочный чехол к западу от разлома залегает спокойно, а к востоку деформирован, что может указывать на условия сжатия, которые возникают здесь в результате кулисного расположения сдвигов (рис. 5б).

Условия сжатия наблюдаются как в самом прогибе, так и на его бортах, где на отдельных участках профилей LV56-03 и LV56-27 (рис. 4) видны субвертикальные разломы и складчатые деформации. Определить их простирания не представляется возможным в силу слабой изученности рельефа. Единственным исключением является один из разломов, пересекаемый профилем LV56-03 и расположенный на участке, где проводилась батиметрическая съемка многолучевым эхолотом (рис. 4 и 5а). Этот разлом, судя по наклону плоскости сместителя и деформациям в его висячем крыле, можно интерпретировать как взброс, ориентированный в северо-западном направлении.

Ориентировка сбросов и взбросов по отношению к субмеридиональным сдвигам дает

основание сделать вывод, что смещения на последних должны быть правосторонними. Дополнительным подтверждением этого вывода является расположение замкнутых депрессий на северной оконечности прогиба, которые смещены относительно друг друга по типу правостороннего сдвига (рис. 5б).

Наличие газа в осадках

Ранее предполагалось (Baranov et al., 2008), что замкнутые депрессии представляют собой структуры, образованные за счет взрывного выделения газа из осадочной толщи. В связи с этим мы рассмотрим новые данные с целью ответа на вопрос о наличии или отсутствии свободного газа в осадках рассматриваемого района и, в частности, в замкнутых депрессиях.

Наиболее очевидно на наличие свободного газа в осадочной толще указывают гидроакустические аномалии (газовые факелы), которые фиксируются в районах выделения газа в водную толщу и обусловлены значительным контрастом импедансов между водой и газовыми пузырьками. Множество таких аномалий было зарегистрировано на восточном склоне о. Сахалин к северу от рассматриваемого прогиба (Саломатин, Юсупов, 2011; Baranov et al., 2008; Jin et al., 2011; Shoji et al., 2009). Съемка, выполненная в пределах исследованного района, не обнаружила газовых факелов ни в депрессиях, ни в самом прогибе (Operation..., 2011; 2012). Единичный газовый факел был зарегистрирован только в северо-западном углу района за пределами прогиба на глубине 780 м (рис. 2а).

Следующим признаком наличия газа в осадочной толще является присутствие на сейсмических разрезах вертикальных зон с отсутствием отражающих горизонтов (акустически прозрачных) или с наличием хаотически расположенных отражений (акустически мутных). Известно, что подобного рода картина обусловлена насыщенностью осадков газами и поскольку эти зоны достаточно узкие и вертикальные, то они носят название «газовых каналов» (gas chimneys). Множество таких каналов было выделено на сейсмических профилях на северо-восточном склоне о. Сахалин (Прокудин, 2013; Baranov et al., 2008; Jin et al., 2011; Lüdmann, Wong, 2003; Shoji et al., 2009).

В пределах рассматриваемого района четыре газовых канала было обнаружено на сейсмоакустических профилях, например, на профиле LV-27 (рис. 4). Они представляют собой вертикальные зоны акустической прозрачности, которые протягиваются до поверхности. На отрезке одного из сейсмических профилей выделяется отражающий горизонт BSR (bottom simulating reflector), который сечет остальные рефлексоры.

Наличие BSR является одним из признаков присутствия газогидратов в осадочном разрезе (Hyndman, Devis, 1992; Lee et al., 1994).

Множество вертикальных зон акустической прозрачности, которые можно интерпретировать в качестве газовых каналов, наблюдается на временном разрезе профиля SE-02 (рис. 4). Некоторые из этих структур заканчиваются в толще осадков, другие прослеживаются до поверхности дна, где в рельефе наблюдаются небольшие депрессии. Подобного рода депрессии были зартированы многолучевым эхолотом к югу от района исследований. Они имеют округлую или слегка вытянутую форму, размеры от 100 м до 800 м, глубину от 5 до 100 м и рассматривались в качестве покмарков (Баранов и др., 2011).

На всех сейсмических профилях газовые каналы появляются при глубинах моря, меньших 1000 м, что дает основание предполагать отсутствие свободного газа на больших глубинах. Газовые факелы также не были обнаружены на бортах прогиба и в замкнутых депрессиях, несмотря на большую детальность выполненной здесь съемки. Это дает основание считать, что в прогибе и на его бортах значительные объемы свободного газа отсутствуют. Данные наблюдения являются аргументами в пользу тектонической природы замкнутых депрессий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Покмарки и покформы

Согласно общепринятому определению покмарки представляют собой округлые или продолговатые депрессии, обычно образующиеся в рыхлых тонкозернистых осадках за счет выброса газа вместе с осадками в водную толщу (Hovland, Judd, 1988). Размеры покмарков колеблются от нескольких метров до нескольких десятков метров при глубине 5–10 м. Образования размерами более 350 м и глубиной свыше 35 м были названы гигантскими покмарками (Kelley et al., 1994). Встречаются также покмарки с линейными размерами более 1 км при глубине несколько десятков метров; такого рода структуры получили название газовых кратеров (Long et al., 1998).

Однако не все структуры, имеющие такую морфологию, могут рассматриваться в качестве покмарков. В работе (Stewart, 1999) выделяется, по крайней мере, десять различных геологических процессов, которые могут быть ответственны за происхождение структур, имеющих округлые формы. Образование некоторых из них обусловлено обрушением или постседиментационными пластическими деформациями осадочной толщи, связанными с тектоникой или растворением соляных диапиров (Bertoni, Cartwright, 2005; Iglesias et al., 2010; Underhill,

2009). Они могут представлять собой эрозионные структуры, такие как промоины, или структуры, образовавшиеся при неравномерном заполнении осадками русел глубоководных каналов и линейных депрессий (Ercilla et al., 2002; Kenyon et al., 1995).

Морфология этих структур сходна с морфологией покмарков, но они имеют иное происхождение, и поэтому для их обозначения был предложен термин покформы (rockforms) (Iglesias et al., 2010). В этой работе было также показано, что замкнутые депрессии не могут быть проинтерпретированы в качестве покмарков только на основании их морфологии. Главное отличие покформ от покмарков заключается в том, что под первыми не наблюдается каких-либо признаков наличия газа.

В пределах исследуемого района находится ряд овальных депрессий с максимальными размерами до 10 км. Анализ сейсмических профилей и сопоставление их с батиметрической картой изучаемого района приводит к выводу, что депрессии связаны с неравномерным проседанием осадков вдоль разломов, и, следовательно, имеют тектоническое происхождение. Проседание происходит по системе разломов, представленных субмеридиональными сдвигами или северо-восточными сбросами.

Разломы являются наиболее эффективными проводящими каналами для миграции свободного газа к поверхности дна (Eichhub et al., 2000). Если вдоль них происходит миграция газа, то они проявляются на сейсмических профилях в виде вертикальных зон акустической прозрачности или мутности, то есть газовых каналов. В пределах исследуемого района выделяется множество разломов, которые могут являться подводными каналами для миграции газа из осадочной толщи и его разгрузки на поверхности морского дна. Если бы в осадках в пределах прогиба присутствовали значительные объемы газа, вблизи разломов должны были бы наблюдаться газовые просачивания или другие признаки его присутствия. Однако, эти признаки (газовые факелы и газовые каналы) не были обнаружены нигде кроме западного склона прогиба выше изобаты 1000 м. Это является дополнительным аргументом в пользу тектонической природы рассматриваемых депрессий и дает основание считать их покформами.

Тектоника и структурный рисунок разломов восточного склона о. Сахалина

Субмеридиональные региональные разломы к востоку от побережья Сахалина выделялись многими авторами, однако интерпретация их кинематики являлась неоднозначной. Они рассматривались в качестве взбросо-сдвигов (Рож-

дественский, 1975), раздвигов (Журавлев, 1984), грабенообразных структур (Gnibidenko, 1990) и сутур неясной природы (Worrall et al., 1996).

В одной из последних работ, посвященных этому вопросу и являющейся обобщением большого объема геофизических данных (Харахинов, 2010) показано, что субмеридиональные разломы являются правосторонними сдвигами, которые опережаются сбросами и взбросами (рис. 7а). В этой работе также представлена тектоническая карта на восточный склон острова от 56°с.ш. до 48°с.ш.; ниже рассмотрим более детально ее участок, охватывающий прогиб и прилежащие участки склона.

В пределах этого района сдвиги не показаны, но выделяются две области, характеризующиеся транспрессивным и транстенсионным режимами (рис. 7б). Транспрессивным (transpressional) режимом называются тектонические условия, сочетающие сдвиговые смещения с компонентой сжатия, а транстенсионный (transtensional) режим наряду со сдвиговыми смещениями характеризуется компонентой растяжения. В обеих областях располагается несколько поднятий и прогибов, причем в транспрессивной области они ориентированы в субмеридиональном направлении, а в транстенсионной области – в северо-восточном. Аналогичные простирания имеют разломы, которые ограничивают эти поднятия и прогибы, причем в транспрессивной области они являются взбросами, а в транстенсионной – сбросами.

В пределах области транстенсионной тектоники, где расположен исследуемый район, на шельфе и в верхней части склона выделяются Киринское и Мынгинское поднятия (рис 7б). Они разделяются Мынгинской грабен-синклинальной зоной, которая протягивается в северо-восточном направлении и ограничена разломами аналогичного простирания. Южный разлом, называемый Центрально-Охотским разломом является сбросом, плоскость которого падает на северо-запад. Разлом, ограничивающий Киринское и Южно-Дерюгинское поднятия, также является сбросом с аналогичным направлением падения плоскости сместителя (Харахинов, 2010).

Сопоставление этой тектонической карты с данными, полученными нами по рельефу и разрывным нарушениям исследованного района, приводит к следующим выводам. Во-первых, для структурных элементов, выделенных в фундаменте, не наблюдается их корреляции с рельефом дна ниже изобаты 750 м и прогиб, ограниченный изобатой 1250 м, почти полностью располагается в пределах Южно-Дерюгинского поднятия. Только северо-западный борт прогиба совпадает с разломом, тогда как его юго-восточный

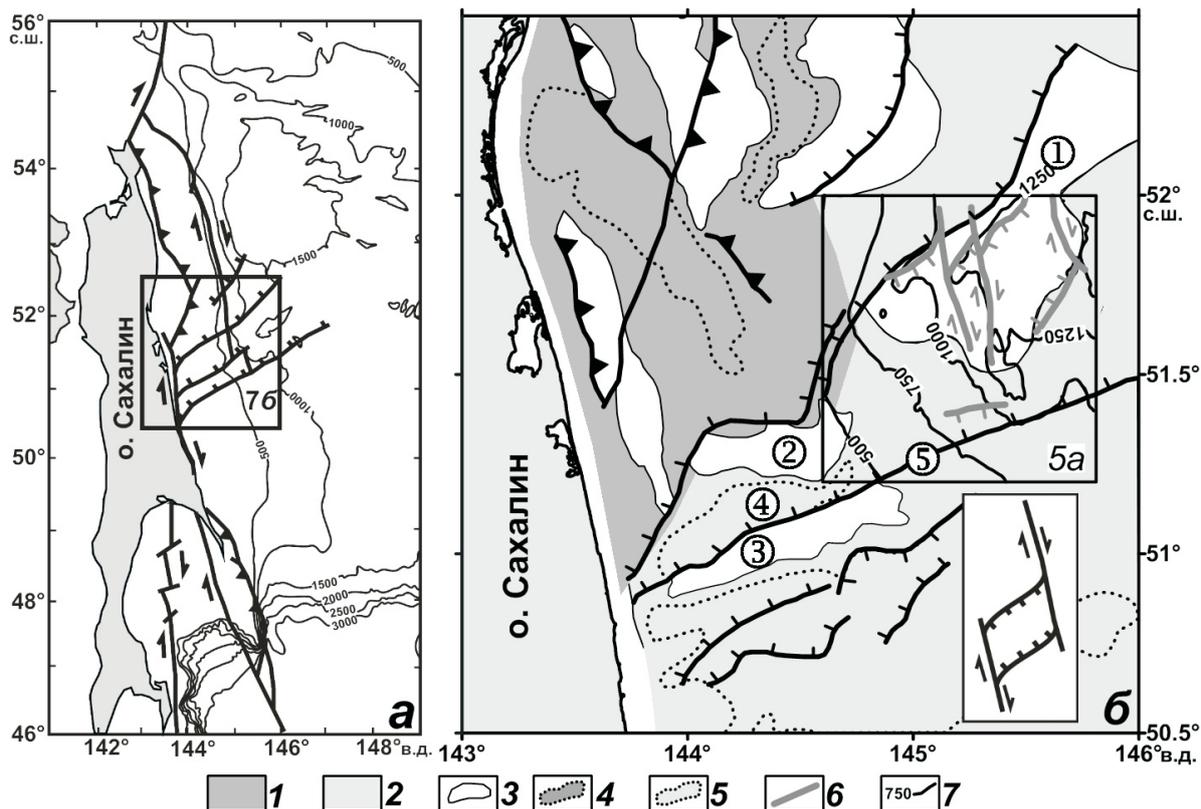


Рис. 7. Генеральная схема разломов восточного склона о. Сахалин (а) и тектоническая схема центральной части восточного склона (б), по Харахинову (2010 с упрощениями): 1 – область трансpressивной тектоники, 2 – область трансensionной тектоники, 3 – поднятия, 4-5 – синклинальные и грабен-синклинальные зоны в областях трансpressивной (4) и трансensionной (5) тектоники, 6 – основные разломы, выделенные в настоящей работе, 7 – изобаты. Остальные условные обозначения см. рис. 5. На врезке показана принципиальная схема образования котловины растяжения, которая в рельефе дна соответствует прогибу. Поднятия: 1 – Южно-Дерюгинское, 2 – Киринское, 3 – Мынгинское. 4 – Мынгинская грабен-синклинальная зона. 5 – Центрально-Охотский разлом.

борт находится на значительном удалении от Центрально-Охотского разлома (рис. 7б).

Во-вторых, наблюдается неплохая корреляция современных разломов с разрывными нарушениями фундамента, но при более крупном масштабе выявляется больше деталей структурного плана. Так, единичный сдвиг, попадающий в район исследований (рис. 7а), распадается на несколько сдвиговых разломов (рис. 7б). Существуют различия в направлении падения плоскостей сместителя между ранее выделенными сбросами и обнаруженными при наших исследованиях (рис. 7б). Кроме того, в области, характеризующейся трансensionным режимом, были выделены взбросы и участки деформаций осадочного чехла, которые свидетельствуют о сжатии.

Таким образом, предыдущее исследование и наши работы дают основание утверждать, что структурный план разрывных нарушений на восточном склоне о. Сахалин определяется наличием субмеридиональных правосторонних сдвигов и оперяющих их северо-восточных сбросов и северо-западных взбросов. Условия

растяжения и сжатия очень часто возникают на протяженных сдвигах при небольших изменениях в их простирании, при кулисном расположении отдельных сегментов сдвига или на их окончаниях. В связи с этим чередование трансpressивных и трансensionных режимов, как определили наши исследования, происходит гораздо чаще по сравнению с тем, что показано на рис. 7б. Это может быть справедливо и для всего восточного склона, который подразделен на две крупные области трансpressивную к северу 52° с.ш. и трансensionную к югу от этой широты (Харахинов, 2010).

Несмотря на наличие структур сжатия, трансensionный режим преобладает в пределах рассматриваемого района. В результате этого формируется прогиб, который можно рассматривать в качестве котловины растяжения (pull-apart basin). Эта структура является наиболее примечательным элементом морфологии восточного склона о. Сахалин и ее образование обусловлено растяжением, возникающим на кулисном сочленении двух отрезков правостороннего субмеридионального сдвига (рис. 7б, врезка).

ВЫВОДЫ

Список литературы

В результате наших исследований было установлено, что образование крупных замкнутых депрессий на восточном склоне центральной части о. Сахалин происходит не за счет газовых выбросов, а в результате проседания осадков вдоль современных разломов. Эти разломы представлены субмеридиональными правосторонними сдвигами и сопряженными с ними сбросами северо-восточного и взбросами северо-западного простираний.

Структурный рисунок современных разломов и их кинематика в целом соответствуют структурному рисунку и кинематике разломов, которые были выделены для фундамента (Харахинов, 2010). В отличие от схемы данного автора, который относит исследованный район к области трансензионной тектоники, в его пределах при большей детализации наблюдаются структуры сжатия. Наличие структур сжатия и растяжения является характерным для зон сдвига и зависит от ориентировки соответствующих разломов, то есть взбросов или сбросов.

Хотя разломы служат прекрасными подводными каналами, по которым свободный газ из осадочного чехла мигрирует и разгружается на дне, газовые факелы и газовые каналы ни в одной из замкнутых депрессий обнаружены не были. Это указывает на отсутствие значительных объемов газа в пределах прогиба и тем самым подтверждает тектоническую природу замкнутых депрессий.

В пределах прогиба свободный газ, источником которого могут быть нижележащие скопления углеводородов, в осадочном чехле отсутствует и обнаруживается, начиная с глубин моря менее 1000 м. Это позволяет предположить, что возможные залежи углеводородов располагаются только под шельфом и склоном выше этой изобаты.

Работы по проектам, данные которых были использованы в статье, финансировались Федеральным министерством образования и научных исследований Федеративной республики Германия и Министерством образования и науки Российской Федерации (КОМЭКС), Технологическим институтом Китами, Япония и Корейским институтом полярных исследований (ГГСС). Авторы благодарны участникам морских экспедиций в рамках этих проектов за кооперацию в получении данных, представленных в статье. Обработка материала была выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23.

Авторы благодарны рецензентам за замечания, которые способствовали улучшить работу.

- Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. и др.* Оползни на восточном склоне острова Сахалин как источники возможных цунами // Доклады академии наук. 2013. Т.449. № 3. С. 334-337.
- Баранов Б.В., Дозорова К.А., Саломатин А.С.* Покмарки восточного склона острова Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Выпуск № 18. С. 231-243.
- Журавлев А.В.* Сравнительная характеристика впадин Дерюгина и ТИНРО Охотского моря // Тихоокеанская геология. 1984. № 1. С. 21-27.
- Прокудин В.Г.* Некоторые аспекты интерпретации временных разрезов (по материалам МОВ в Охотском море) // Тихоокеанская геология. 2013. том 32. №2. С. 78-85.
- Рождественский В.С.* Сдвиги Северо-Восточного Сахалина // Геотектоника. 1975. № 2. С. 85-96.
- Саломатин А.С., Юсупов В.И.* Акустические исследования газовых «факелов» Охотского моря // Океанология. 2011. 51. № 5. С. 1-9.
- Сваричевский А.С.* Рельеф дна Охотского моря // Проблемы морфотектоники Западно-Тихоокеанской переходной зоны // ТОИ ДВО. Владивосток. 2001. С. 82-97.
- Харахинов В.В.* Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
- Baranov B.V., Jin Y.K., Shoji H. et al.* Gas Hydrate System of the Sakhalin Slope: Geophysical approach // Scientific Report of the Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2007. KOPRI, 2008. 116 p.
- Bertoni C., Cartwright J.A.* 3D seismic analysis of circular evaporite dissolution structures, Eastern Mediterranean // Journal of the Geological Society. 2005. V. 162. № 6. P. 909-926.
- Cruise Report SO178-KOMEX.* Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea // Dullo W.C., Biebow N., Georgeleit K. et al. Kiel, 2004. 125 p.
- Ercilla G., Alonso B., Baraza J. et al.* The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model // Marine Geology. 2002. V. 184. № 3-4. 303-318 P. 303-318.
- Eichhub P., Greene H.G., Naehr T. et al.* Structural control of fluid flow: offshore fluid seepage in the Santa Barbara Basin // Journal of Geochemical Exploration. June 2000. V. 69/70. № 1. P. 545-549.
- Gnibidenko H.S.* The rift system of the Okhotsk Sea // Proceedings of the First International Conference on Asia Marine Geology, Shanghai, China: Beijing: Ocean Press, 1990. P. 73-81.
- Harding T.P.* Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion // Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. 1985 V. 69. № 4. P. 582-600.

- Hyndman R.D., Davis E.E.* A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion // *Journal of Geophysical Researches*. V. 95. № B5. 1992. P. 7025-7041.
- Hovland M., Judd A.G.* Seabed Pockmarks and Seepages. London: Graham and Trotman, 1988. 293 p.
- Jin Y.K., Kim Y.G., Baranov B. et al.* Distribution and expression of gas seeps in a gas hydrate province of the northeastern Sakhalin continental slope, Sea of Okhotsk // *Marine and Petroleum Geology*. 2011. V. 28. № 10. P. 1844-1855.
- Iglesias J., Ercilla G., Garcia-Gil S. et al.* Pockforms: evaluation of pockmark-like seabed features on the Landes Plateau, Bay of Biscay // *Geo-Marine Letters*. 2010. V. 30. № 3-4. P. 207-219.
- Kelley J.T., Dickinson S.M., Belknap D.F. et al.* Giant seabed pockmarks: evidence for gas escape in Belfast Bay // *Maine Geology*. 1994. V. 22. № 1. P. 59-62.
- Kenyon N.H., Millington J., Droz L., Ivanov M.K.* Scour holes in a channel-lobe transition zone on the Rhone cone // *Atlas of Deep Water Environments. Architectural Style in Turbidite Systems*. Chapman and Hall. London. 1995. P. 212-215.
- Lee M.W., Hutchinson D.R., Agena W.F. et al.* Seismic character of gas hydrates on the southeastern U.S. continental margin // *Marine Geophysical Researches*. 1994. V. 16. № 3. P. 163-184.
- Long D., Lammers S., Linke P.* Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea // *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change* / Henriot J-P, Mienert J. (Eds.) Geological Society of London, Special Publication. 1998. V. 137. P. 223-237.
- Lüdmann T., Wong H.K.* Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. V. 201. № 4. P. 269-286.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2010, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 50 / Jin Y.K., Shoji H., Obzhairov A., Baranov B., Korea Polar Research Institute, 2011. 129 p.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2011, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 56 // Shoji H., Jin Y.K., Obzhairov A., Baranov B. New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology. Kitami, 2012. 140 p.
- Shoji H., Jin Y.K., Obzhairov A. et al.* Methane Hydrates and Plumes in the Sea of Okhotsk // *Journal of Geography. Special Issue on Methane Hydrate*. 2009. V. 118. № 1. P. 175-193.
- Stewart S.A.* Seismic interpretation of circular geological structures // *Petroleum Geoscience*. 1999. V. 5. № 3. P. 273-285.
- Twiss R.J., Moores E.M.* Structural geology. New York: W.H. Freeman & Company, 1992. 736 p.
- Underhill J.R.* Role of intrusion-induced salt mobility in controlling the formation of the enigmatic 'Silverpit Crater', UK Southern North Sea // *Petroleum Geoscience*. 2009. V. 15. № 3. P. 197-216.
- Wong H.K., Lüdmann T., Baranov B.V. et al.* Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the north-western Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. V. 201. № 4. P. 287-305.
- Worrall D.M., Kruglyak V., Kunst F. et al.* Tertiary tectonics of the Sea of Okhotsk, Russia: Far-field effects of the India-Eurasia collision // *Tectonics*. 1996. V. 15. № 4. P. 813-826.

THE ORIGIN OF ENCLOSED DEPRESSIONS ON THE EASTERN SAKHALIN SLOPE

B.V. Baranov¹, D.D. Rukavishnikova¹, V.G. Prokudin², Y.-K. Jin³, K.A. Dozorova¹

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Nakhimovsky av., 36, Russia; e-mail: bbaranov@ocean.ru*

²*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Baltiyskaya str., 43, Russia*

³*Korea Polar Research Institute 213-3 Songdo-Dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea.*

The article presents new data on bathymetric and seismoacoustic research obtained in frames of two international projects in central part of Eastern Sakhalin slope. Enclosed depressions that were mapped within the study area are not pockmarks, which occur on the sea bottom due to blasts of gas from sediments as it had been supposed previously. Such formations are caused by subsidence of sediments along the system of modern faults. The faults are represented by NS-striking strike-slips and the related normal and reverse faults.

Keywords: eastern Sakhalin slope, enclosed depressions, sediment cover, faults.