

Геномное сканирование, контроль происхождения

УДК 636.32/38:575.113:577.2.08:51-76

doi: 10.15389/agrobiology.2015.6.746rus

ВАЛИДАЦИЯ ПАНЕЛИ SNP-МАРКЕРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ РОССИЙСКИХ ПОРОД ОВЕЦ*Т.Е. ДЕНИСКОВА¹, А.В. ДОЦЕВ¹, Е.А. ГЛАДЫРЬ¹, А.А. СЕРМЯГИН¹,
В.А. БАГИРОВ¹, У.В. ХОМПОДОВА^{1, 2}, А.Н. ИЛЬИН^{1, 2}, Г. БРЕМ^{1, 3},
Н.А. ЗИНОВЬЕВА¹

Создание панелей для контроля происхождения овец на основе наиболее высокоинформативных SNP (single nucleotide polymorphism) с частотой минорных аллелей $MAF \geq 0,3$ — актуальная проблема овцеводства. Международным обществом генетики животных (International Society for Animal Genetics, ISAG) предлагается использование панели происхождения из 88 аутомных SNP, разработанной Международным консорциумом по геномике овец (International Sheep Genomics Consortium, ISGC). Однако эта панель базируется на результатах оценки ДНК-профилей только североамериканских, новозеландских и австралийских пород овец. Российские породы не были включены в исследование, и вопрос о возможности применения панели ISAG для подтверждения достоверности их происхождения остается открытым. Мы провели полногеномное исследование SNP у четырех аборигенных российских пород овец — романовской (ROM, $n = 22$), забайкальской тонкорунной (ZBL, $n = 7$), полугрубшерстной бурятской овцы Буубей (BUB, $n = 15$) и тувинской короткожирнохвостой (TUV, $n = 16$) с использованием Ovine SNP50k BeadChip. Обработку полученных данных проводили для общего числа маркеров (54241 SNP) и для 88 аутомных SNP, рекомендованных ISAG. Для оценки информативности панели в контроле происхождения для каждой из пород и для всей выборки в целом определяли долю $MAF \geq 0,3$, среднюю частоту MAF , вероятность совпадения генотипов (P1) и вероятности исключения в качестве родителей (P1, P2, P3). Универсальность панели оценивали посредством сравнения степени генетической дифференциации пород на основании всего спектра SNP и панели ISAG, используя в качестве критериев значения индекса F_{st} (AMOVA) при парном сравнении и результаты анализа главных компонент (PCA плот). Для расчетов использовали программное обеспечение Plink 1.09 и GenAlEx 6.5. По результатам контроля качества всей выборки было отобрано 47385 SNP со средним значением $MAF = 0,292 \pm 0,131$. Значение MAF для 88 SNP происхождения составило $0,380 \pm 0,091$. Большая часть SNP (81,8 %) оказались информативными ($MAF \geq 0,3$). Доля информативных SNP различалась между породами и составляла 56,8 % у ROM, 63,4 % — у ZBL, 71,6 % — у BUB и 72,7 % — у TUV. При этом 21 SNP (23,9 %) были высокоинформативны во всех четырех породах; 37 SNP (42,0 %), 17 SNP (19,3 %) и 10 SNP (11,4 %) оказались информативными соответственно в трех, двух или только в одной породе. Маркер DU196132_525.1 был мономорфен у овец TUV ($MAF = 0$). Три SNP с $MAF < 0,3$ (DU232924_365.1, DU501115_497.1 и DU372582_268.1) были неинформативны для всех четырех пород. Более низкие попарные значения F_{st} при использовании 88 SNP по сравнению с полногеномными SNP-профилями при сохранении характера выявленных связей подтвердили высокую универсальность панели ISAG. Низкая породная зависимость SNP панели подтверждалась формированием на PCA плоте слабо консолидированных перекрывающихся массивов, соответствующих отдельным породам. Вероятность совпадения генотипов по 88 SNP составила от $4,32 \times 10^{-33}$ у TUV до $7,48 \times 10^{-33}$ у BUB. Вероятность исключения в качестве родителя составила $P1 \geq 99,99$ % для всех четырех пород. Значение P2 оказалось максимальным для TUV ($P2 \geq 99,99$ %), для трех остальных пород — $P2 \geq 99,98$ %, значение P3 для всех пород было $\geq 99,99$ %. Полученные нами данные, хотя и обнаруживают некоторую породную зависимость панели ISAG, в целом показывают ее пригодность для контроля достоверности происхождения четырех аборигенных российских пород овец.

Ключевые слова: генотипирование SNP, локальные породы овец, MAF , панель ISAG, контроль происхождения.

Генетическое совершенствование пород сельскохозяйственных животных основано на оценке и отборе индивидумов, обладающих наибольшей племенной ценностью (estimated breeding value, EBV) по селекционно

* Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-36-00039. При проведении исследований было использовано оборудование ЦКП «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста.

значимым признакам. Достоверность EBV непосредственно связана с точностью записей родословных, поэтому ошибки в идентификации родителей приводят к снижению генетического прогресса и, как следствие, к экономическим потерям (1). Информация о родословной необходима для контроля степени инбридинга — одного из важных элементов системы управления генетическими ресурсами животных (2).

Микросателлиты были открыты в 1984 году и известны также под названием коротких tandemных повторов (STR, short tandem repeats), или коротких повторов последовательностей (SSR, short sequence repeats) (3). Благодаря высокой степени полиморфизма, менделевскому типу наследования и равномерному распределению по всему геному они более 25 лет оставались наиболее широко используемым типом ДНК-маркеров для контроля происхождения сельскохозяйственных животных разных видов (4-8).

Развитие высокопроизводительных методов анализа генома привело к созданию и использованию панелей на основе полиморфизмов единичных нуклеотидов (single nucleotide polymorphism, SNP) при идентификации происхождения животных (9-13). Хотя SNP-маркеры менее полиморфны по сравнению с STR (большинство SNP биаллельны), этот недостаток полностью нивелируется благодаря возможности проводить одновременный анализ нескольких десятков и даже сотен SNP с относительно небольшими затратами. Преимущества анализа SNP состоят в отсутствии особых требований к качеству ДНК (анализ SNP проводится, как правило, посредством получения коротких ампликонов длиной менее 100 п.н.), автоматизации процесса генотипирования, легкости в интерпретации результатов, возможности прямого сопоставления данных между лабораториями.

Обеспечение высокой достоверности контроля происхождения животных на основе SNP требует использования большего числа локусов по сравнению с STR. В исследованиях, проведенных на человеке (14, 15), свиньях (16), мясном и молочном крупном рогатом скоте (17, 18), было показано, что для достижения сходной информативности на 1 STR требуется 3-6 SNP. При этом авторы указывают, что повышение информативности SNP панелей может достигаться за счет увеличения числа исследуемых полиморфизмов и приближения средней частоты минорных аллелей (minor allele frequency, MAF) к 0,5. По данным K.G. Dodds с соавт. (19), для достижения информативности, аналогичной таковой у широко используемых панелей на основе STR, необходимо в 3-4 раза больше SNP, в то время как в случае панелей на основе доминантных маркеров (например, ISSR и AFLP) последних должно быть в 17 раз больше.

Среди подходов, используемых для определения происхождения индивидумов на основе ДНК (простое исключение, распределение по категориям и фракциям, реконструкция генотипа) (20, 21), наиболее распространен метод исключения родителей. Он основан на принципе, согласно которому у потомков в каждом локусе должны быть только аллели, имеющиеся у родителей, и вероятность исключения (probability of exclusion, PE) — это вероятность того, что заявленный индивид исключается в качестве родителя (22). Этот метод требует высокой точности генотипирования (> 99 %) и значений $MAF \geq 0,3$. Ключевым фактором, определяющим эффективность систем контроля происхождения, служит выбор SNP.

Разработка панелей SNP маркеров для анализа происхождения овец была начата после создания Международным консорциумом по геномике овец (International Sheep Genomics Consortium, ISGC) чипа средней плотности Ovine SNP50K BeadChip, включающего 54241 SNP (23). В настоящее

время для овец создано шесть панелей, различающихся набором и числом SNP. Консорциумом ISG предложена панель, включающая 88 SNP (24), содружеством CSIRO (Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Австралия) и Центром SheepCRC (Sheep Cooperative Research Centre, Австралия) — 382 SNP (25), научно-исследовательским институтом AgResearch (Новая Зеландия) — 84 и 300 SNP (12). М.Р. Heaton с соавт. (13) разработали панель SNP для оценки глобального разнообразия пород, включающую 163 SNP, и выделили среди них набор из 109 SNP для использования на североамериканских породах овец.

В качестве официальной панели для тестирования происхождения домашних овец Международным обществом генетики животных (ISAG, International Society for Animal Genetics) рекомендованы 88 аутомных маркеров, предложенные Консорциумом ISG и дополненные одним Y-хромосомным SNP (26). Выбор SNP для включения в панель осуществлялся по результатам тестирования 22 пород овец из Африки, Азии и Европы с использованием технологии Golden Gate (10). Отобранные SNP были оценены на расширенной выборке из 74 пород с использованием технологии Infinium (23). В последующем была показана возможность анализа этой панели с помощью технологий Fluidigm и Sequenom (27).

Следует отметить, что вышеназванные SNP панели контроля происхождения не были протестированы на российских породах овец. Среди 74 пород, используемых для оценки информативности официальной панели ISAG, присутствовали овцы североамериканской популяции российской аборигенной романовской породы. Однако ограниченность выборки и отсутствие ясности в ее происхождении не позволяют говорить о представительности породы в целом.

Целью нашей работы стала оценка информативности панели ISAG из 88 аутомных маркеров, принятой в качестве официальной панели для тестирования происхождения домашних овец, при контроле происхождения российских локальных пород.

Методика. Исследуемая выборка была представлена четырьмя локальными российскими породами овец — романовской (ROM, $n = 22$), забайкальской тонкорунной (ZBL, $n = 7$), аборигенной полугрубошерстной бурятской овцой Буубей (BUB, $n = 15$) и тувинской короткожирнохвостой (TUV, $n = 16$).

Геномную ДНК выделяли с помощью колонок Nexttec («Nexttec™ Biotechnologie GmbH», Германия) в соответствии с рекомендациями производителя. Скрининг SNP выполняли с использованием чипа Ovine SNP50K BeadChip («Illumina Inc.», США). Обработку полученных данных проводили как для общего числа прогенотипированных маркеров (54241 SNP), так и для 88 аутомных SNP, рекомендованных ISAG для подтверждения происхождения домашних овец (далее панель ISAG, или панель происхождения). Пороговым критерием для определения аллеля в качестве информативного было выбрано значение $MAF \geq 0,3$.

Контроль качества SNP и статистический анализ полученных данных, в том числе определение MAF, расчет индекса фиксации F_{st} при парном сравнении по B.S. Weir с соавт. (28) и анализ главных компонент (principal component analysis, PCA) осуществляли в программе Plink 1.07 (29). Для анализа отбирали SNP, локализованные на аутомных хромосомах и прошедшие контроль качества по следующим параметрам: по показателю GenCall, указывающему достоверность результатов генотипирования ($GC > 0,5$), частоте минорных аллелей ($MAF > 0,01$), тесту на равновесие Харди-Вайнберга ($HWE > 1e^{-6}$) и уровню генотипирования ($GENO > 0,01$).

Визуализацию данных, в том числе построение PCA плотов и графиков распределения SNP-маркеров по группам в зависимости от MAF, осуществляли с помощью языка программирования R (30).

Вероятность совпадения генотипов (probability of identity, PI) для каждого локуса рассчитывали, используя формулу (31):

$$PI = 2 \times (\sum p_i^2)^2 - \sum p_i^4,$$

где p_i — частота i -го аллеля в локусе.

Значения PI для числа несцепленных маркеров k определяли как произведение индивидуальных PI каждого маркера.

Вероятность исключения (probability of exclusion, PE) для каждого локуса определяли для трех частных случаев.

1. Исключение одного родителя, если известны генотипы обоих родителей и потомка (P1) (32):

$$P1 = 1 - 2 \times \sum p_i^2 + \sum p_i^3 + 2 \times \sum p_i^4 - 3 \times \sum p_i^5 - 2 \times (\sum p_i^2)^2 + 3 \times \sum p_i^2 \times \sum p_i^3.$$

2. Исключение родителя, если известны генотипы одного родителя и потомка (P2) (33):

$$P2 = 1 - 4 \times \sum p_i^2 + 2 \times (\sum p_i^2)^2 + 4 \times \sum p_i^3 - 3 \times \sum p_i^4.$$

3. Исключение обоих родителей, если известны генотипы родителей и потомка (P3) (33):

$$P3 = 1 + 4 \times \sum p_i^4 - 4 \times \sum p_i^5 - 3 \times \sum p_i^6 - 8 \times (\sum p_i^2)^2 + 8 \times (\sum p_i^2) \times (\sum p_i^3) + 2 \times (\sum p_i^3)^2.$$

Значения P1, P2, P3 (P) для k -го числа несцепленных маркеров определяли по формуле:

$$P = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times (1 - P_3) \dots \times (1 - P_k).$$

Для расчетов PI, P1, P2 и P3 использовали программное обеспечение GenAIEx 6.5 (34).

Результаты. Результативность полногеномного SNP генотипирования (call rate) варьировала между породами от 91,5 % (BUB и TUV) до 91,8 % (ROM) и 91,9 % (ZBL) и для всей выборки овец составила 91,7 %. Все исследованные животные прошли контроль на соответствие критерию animal call rate ≥ 90 %. Поскольку исследования предусматривали анализ только аутосомных маркеров, из него были исключены 1828 SNP, локализованных на половых хромосомах. Не прошли контроль по критериям качества чтения (GC Score $\geq 0,5$) и степени кластеризации (GC Score $\geq 0,3$) 1371, 1469, 1665 и 1636 SNP соответственно у ROM, ZBL, BUB и TUV. Затем у исследованных пород были исключены соответственно 3479, 3663, 3743 и 3786 полиморфизмов как не соответствующие критерию SNP call rate ≥ 90 %. Все оставшиеся маркеры удовлетворяли критерию χ^2 на равновесие в популяции по Харди-Вайнбергу, и для дальнейшего анализа были отобраны 47563 (87,7 %) SNP у ROM, 47281 (87,2 %) у ZBL, 47005 (86,7 %) у BUB и 46991 (86,6 %) у TUV. Для анализа всей выборки отобрали 47385 полиморфизмов (87,4 % от числа исследованных).

При оценке результатов генотипирования SNP, включенных в панель ISAG, контроль качества (SNP call rate = 99,2 %) прошли 87 из 88 локусов, за исключением DU426312_454.1, который был успешно генотипирован только у 55 % животных. Однако для того, чтобы иметь данные, сопоставимые с полученными в других исследованиях, этот SNP включили в дальнейший анализ.

В исследованной выборке овец большая часть маркеров происхождения (81,8 % SNP) оказались информативными (MAF $\geq 0,3$). Так, 51,1 и 30,7 % SNP встречались в диапазоне частот соответственно от 0,4 до 0,5 и от 0,3 до 0,4. Низкоинформативными были 1,1 % SNP, встречающихся с частотой от 0 до 0,1 %. Распределение всех исследованных SNP по груп-

пам в зависимости от MAF было более равномерным: для MAF > 0,0- < 0,1; $\geq 0,1$ - < 0,2; $\geq 0,2$ - < 0,3; $\geq 0,3$ - < 0,4 и $\geq 0,4$ - $\leq 0,5$ доли SNP составили соответственно 9,2; 17,8; 21,2; 24,6 и 26,2 %.

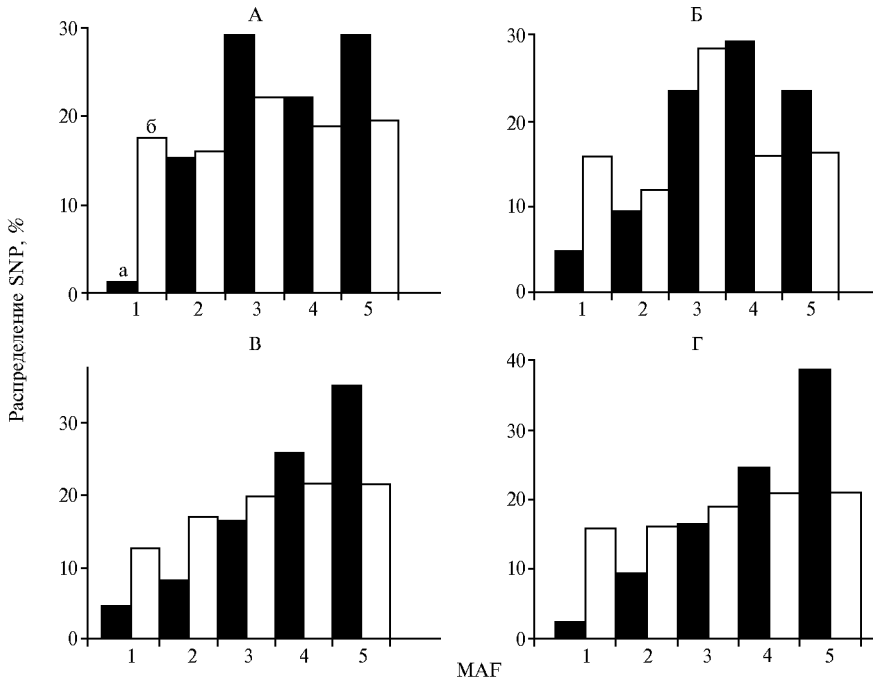


Рис. 1. Распределение исследованных SNP (single nucleotide polymorphism) у овец пород романовская (А), забайкальская тонкорунная (Б), Буубей (В) и тувинская короткожирнохвостая (Г) в зависимости от средней частоты минорных аллелей (minor allele frequency, MAF): 1 — > 0,0- < 0,1, 2 — $\geq 0,1$ - < 0,2, 3 — $\geq 0,2$ - < 0,3, 4 — $\geq 0,3$ - < 0,4, 5 — $\geq 0,4$ - $\leq 0,5$; а — 88 SNP, включенных в панель ISAG (International Sheep Genomics Consortium), б — 47385 SNP, отобранных по результатам контроля качества для пород.

Доля информативных SNP различалась между породами и составляла 56,8 % у ROM, 63,4 % — у ZBL, 71,6 % — у BUB и 72,7 % — у TUV (рис. 1). Полиморфизмы с MAF < 0,1 встречались во всех исследованных породах, причем наибольший процент малоинформативных маркеров отмечался у ZBL и BUB (по 4,5 %), а наименьший — у ROM (1,1 %). Этот факт, возможно, объясняется тем, что среди животных, участвовавших в тестировании панели происхождения (13, 26), были 10 овец романовской породы. Однако эти овцы были представлены только североамериканской популяцией, которая не может характеризовать породу в целом. У овец TUV 2,3 % маркеров имели MAF < 0,1, при этом маркер DU196132_525.1 был мономорфным.

Средние значения MAF составили для ROM — $0,332 \pm 0,110$, для ZBL — $0,335 \pm 0,118$, для BUB — $0,347 \pm 0,121$ и для TUV — $0,360 \pm 0,109$, в целом по выборке — $0,380 \pm 0,091$. При использовании полногеномной панели средние значения MAF для ROM, ZBL, BUB и TUV равнялись соответственно $0,261 \pm 0,146$; $0,272 \pm 0,146$; $0,269 \pm 0,143$ и $0,272 \pm 0,142$, для всей выборки — $0,292 \pm 0,131$.

Из 88 маркеров происхождения для 21 SNP (23,9 %) отмечали высокую информативность во всех четырех породах (MAF $\geq 0,3$); 37 (42,0 %), 17 (19,3 %) и 10 SNP (11,4 %) оказались информативными соответственно в трех, двух и только в одной породе. Три SNP были неинформативны для всех четырех пород (табл. 1).

1. SNP (single nucleotide polymorphism) происхождения и среднеарифметические значения MAF (minor allele frequency) для четырех локальных российских пород

SNP	Хромосома	MAF				все породы*
		ROM	ZBL	BUB	TUV	
SNP - маркеры для четырех локальных пород овец (MAF < 0,3)						
DU232924_365.1	1-я	0,068	0,071	0,067	0,156	0,092
DU501115_497.1	2-я	0,182	0,143	0,200	0,094	0,158
DU372582_268.1	9-я	0,159	0,071	0,067	0,188	0,133
SNP - маркеры для трех локальных пород овец (MAF < 0,3)						
DU305004_417.1	4-я	0,250	0,125	0,393 ⁱ	0,156	0,242
DU453259_440.1	5-я	0,114	0,125	0,231	0,344 ⁱ	0,203
DU530067_219.1	7-я	0,114	0,375 ⁱ	0,250	0,125	0,183
DU213735_493.1	8-я	0,318 ⁱ	0,250	0,286	0,250	0,417
DU417675_79.1	11-я	0,386 ⁱ	0,250	0,179	0,219	0,358
DU275428_276.1	13-я	0,273	0,438 ⁱ	0,286	0,250	0,292
DU223894_556.1	14-я	0,364 ⁱ	0,250	0,286	0,281	0,408
DU264531_279.1	19-я	0,273	0,438 ⁱ	0,286	0,281	0,317
DU258053_237.1	19-я	0,295	0,563 ⁱ	0,250	0,219	0,300
DU380983_440.1	21-я	0,250	0,188	0,036	0,406 ⁱ	0,233

Примечание. ROM — романовская порода, ZBL — забайкальская тонкорунная порода, BUB — Буубей, TUV — тувинская короткожирнохвостая порода. Индексом «i» обозначены информативные SNP, остальные SNP — неинформативные.

* Для MAF представлено не среднеарифметическое значение, а величина, рассчитанная при объединении всех четырех пород в один пул.

Сравнительный анализ PCA плотов, построенных по результатам исследований 47385 SNP и 88 SNP (рис. 2), показал довольно четкую дифференциацию пород при применении всего спектра маркеров, в то время как при использовании панели происхождения формировались мало консолидированные частично перекрывающиеся массивы. Анализ значений F_{st} при парном сравнении как меры генетических различий (табл. 2) ожидаемо подтвердил снижение степени дифференциации при использовании панели происхождения по сравнению с полногеномными SNP-профилями при сохранении характера выявленных генетических связей между породами ($r^2 = 0,95$). Следовательно, полученные данные хоть и подтверждают сохранение породной зависимости SNP панели ISAG, в целом указывают на ее относительно высокую универсальность.

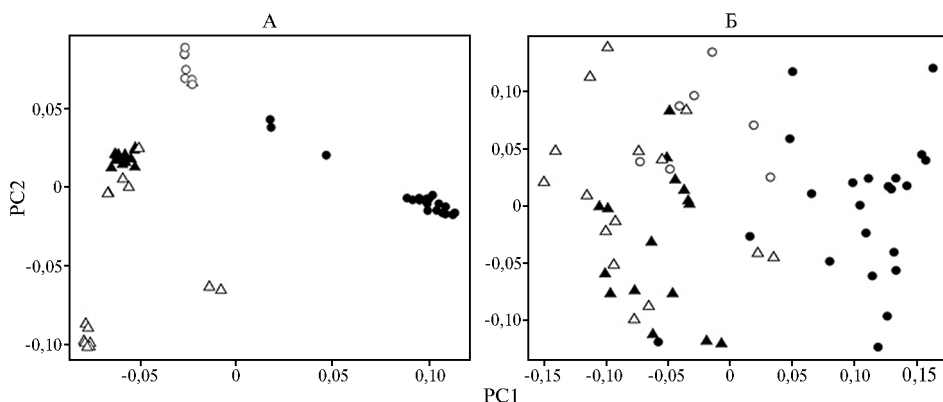


Рис. 2. Анализ главных компонент, выполненный на основе SNP (single nucleotide polymorphism) у овец пород романовская (●), забайкальская тонкорунная (○), Буубей (▲) и тувинская короткожирнохвостая (△): А — PCA плот по 47385 детектируемым OvineSNP50K BeadChip маркерам, Б — PCA (principal component analysis) плот по 88 маркерам, включенным в панель ISAG (International Sheep Genomics Consortium).

Расчет вероятности совпадения генотипов (PI) по 88 SNP показал высокую информативность панели: для ROM, ZBL, BUB и TUV значения PI составили соответственно $5,86 \times 10^{-33}$, $5,24 \times 10^{-33}$, $7,48 \times 10^{-33}$ и $4,32 \times 10^{-33}$.

Вероятность исключения в качестве родителя P1 оказалась $\geq 99,99\%$ для всех четырех пород. Значение P2 было максимальным для TUV ($P2 \geq 99,99\%$), для трех остальных пород — $P2 \geq 99,98\%$. Значение P3 для всех пород было $\geq 99,99\%$.

2. Индекс фиксации F_{st} при парном сравнении для SNP панели происхождения и полногеномных SNP-профилей у сравниваемых пород

Порода	ROM	ZBL	BUB	TUV
ROM		0,0544	0,0578	0,0493
ZBL	0,0797		0,0437	0,0418
BUB	0,0834	0,0537		0,0261
TUV	0,0820	0,0542	0,0318	

Примечание. Над диагональю представлены значения, рассчитанные на основании данных анализа 88 SNP (single nucleotide polymorphism) маркеров, включенных в панель ISAG (International Sheep Genomics Consortium); под диагональю — значения, рассчитанные по 47385 SNP маркерам, отобранным по результатам контроля качества для пород.

Создание панелей для контроля происхождения овец на основании наиболее высокоинформативных SNP — актуальная проблема овцеводства. Так, М.Р. Нетап с соавт. (13) с этой целью использовали 2915 овец 74 породных групп, предоставленных консорциумом ISG, выполнили анализ 47693 аутосомных SNP с помощью множественных критериев и выбрали 163 SNP с желательными свойствами для тестирования происхождения. В среднем

каждый из отобранных SNP оказался высокоинформативным ($MAF \geq 0,3$) в 48 ± 5 породных группах. Для создания панели контроля происхождения североамериканских пород овец из 163 SNP были выбраны 109. Результативность сканирования и точность для этих 109 SNP составила более 99 %.

Число требующихся SNP зависит от MAF и используемой маркерной панели. Посредством математического моделирования Е. Вагуч и J.I. Weller (35) установили, что для достижения вероятности исключения, равной 99 %, нужно от 15 до 54 SNP. Число необходимых SNP возрастает при ограничении количества информации (если известен генотип только одного вероятного родителя) и значении $MAF < 0,1$. При тестировании на российских породах международной панели происхождения, в состав которой входят 88 аутосомных маркеров, доля высокоинформативных SNP в среднем по всей выборке составила 82 %. Необходимо отметить, что такое значение складывается не только из отдельных SNP, высокоинформативных во всех породах, но и за счет маркеров, информативных в двух или трех породах, на что указывают различия для $MAF \geq 0,3$ между породами — от 50,0 до 61,4 %.

Согласно J.W. Kijas с соавт. (27), отбор SNP для создания панели происхождения должен быть проведен со смещением в сторону высоких значений MAF (0,3-0,5) с целью ее унификации, то есть обеспечения возможности использовать панель на широком спектре пород. Наши исследования в целом подтвердили это правило и для российских локальных пород: 56,8; 63,4; 71,6 и 72,7 % животных пород ROM, ZBL, BUB и TUV характеризовались значениями MAF, большими или равными пороговому значению 0,3.

Одним из критериев информативности панели служит определение числа SNP, требующихся для получения высокой вероятности исключения родителей. Нами показано, что при наличии данных о генотипах обоих родителей минимальное число маркеров, необходимое для их исключения в качестве родителей с вероятностью более 99,99 % (критерий P3), для каждой из исследованных пород составляло 27. Для достижения аналогичной вероятности исключения одного из родителей при наличии информации об обоих (P1), требовалось не менее 43 SNP. Если генотип одного из родителей был неизвестен (P2), минимальное необходимое число маркеров возрастало до 66.

Таким образом, основываясь на множестве критериев, в том числе на вероятности совпадения генотипов и вероятности исключения в качестве родителя (родителей), можно сделать вывод, что международная панель ISAG (International Sheep Genomics Consortium), включающая 88 аутосомных маркеров, может быть использована для контроля достоверности происхождения четырех российских локальных пород (романовской, забайкальской тонкорунной, Буубей и тувинской короткожирнохвостой). Для создания наиболее информативной панели с целью оценки происхождения всего спектра пород, разводимых в России, и их роли в обеспечении глобального биоразнообразия домашних овец в дальнейшем следует ориентироваться на увеличение числа исследованных пород, а также на анализ других SNP панелей, предложенных научным сообществом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dodds K.G., Tate M.L., Sise J.A. Genetic evaluation using parentage information from genetic markers. *J. Anim. Sci.*, 2005, 83: 2271-2279.
2. Зиновьева Н.А., Харзинова В.Р., Сизарева Е.И., Гладырь Е.А., Костюнина О.В., Луговой С.И., Тапиха В.А., Гамко Л.Н., Овсеенко Е.В., Шавырина К.М., Эрнст Л.К. Оценка вклада различных популяций в генетическое разнообразие свиней корня крупной белой породы. *Сельскохозяйственная биология*, 2012, 6: 35-42 (doi: 10.15389/agrobiology.2012.6.35rus, doi: 10.15389/agrobiology.2012.6.35eng).
3. Tautz D., Renz M. Simple sequences are ubiquitous repetitive components of eukaryotic genomes. *Nucl. Acids Res.*, 1984, 12: 4127-4138 (doi: 10.1093/nar/12.10.4127).
4. Dakin E.E., Avise J.C. Microsatellite null alleles in parentage analysis. *Heredity*, 2004, 93: 504-509 (doi: 10.1038/sj.hdy.6800545).
5. Зиновьева Н.А., Харзинова В.Р., Логвинова Т.И., Гладырь Е.А., Сизарева Е.И., Чинаров Ю.И. Микросателлитные профили как критерии определения чистопородности и оценки степени гетерогенности подборов родительских пар в свиноводстве. *Сельскохозяйственная биология*, 2011, 6: 47-53.
6. Новгородова И.П., Волкова В.В., Гладырь Е.А., Селионова М.И., Растоваров Е.И., Фисинин В.И., Зиновьева Н.А. Изучение информативности микросателлитов кур *G. gallus* для характеристики аллелофонда индексов *M. gallopavo*. *Достижения науки и техники АПК*, 2011, 10: 66-67.
7. Киселева Т.Ю., Подоба Б.Е., Заблудовский Е.Е., Терлецкий В.П., Воробьев Н.И., Кантанен Ю. Анализ 30 микросателлитных маркеров у шести локальных популяций крупного рогатого скота. *Сельскохозяйственная биология*, 2010, 6: 20-25.
8. Хлесткина Е.К. Молекулярные маркеры в генетических исследованиях и селекции. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 2013, 17(4/2): 1044-1054.
9. Werner F.A., Durstewitz G., Habermann F.A., Thaller G., Kramer W., Kollers S., Buitkamp J., Georges M., Brem G., Mosner J., Fries R. Detection and characterization of SNPs useful for identity control and parentage testing in major European dairy breeds. *Anim. Genet.*, 2004, 35: 44-49 (doi: 10.1046/j.1365-2052.2003.01071.x).
10. Kijas J.W., Townley D., Dalrymple B.P., Heaton M.P., Maddox J.F., McGrath A., Wilson P., Ingersoll R.G., McCulloch R., McWilliam S., Tang D., McEwan J., Cockett N., Oddy V.H., Nicholas F.W., Raadsma H. A genome wide survey of SNP variation reveals the genetic structure of sheep breeds. *PLoS ONE*, 2009, 4: e4668 (doi: 10.1371/journal.pone.0004668).
11. Hayes B.J. Technical note: Efficient parentage assignment and pedigree reconstruction with dense single nucleotide polymorphism data. *J. Dairy Sci.*, 2011, 94: 2114-2117 (doi: 10.3168/jds.2010-3896).
12. Clarke S.M., Henry H.M., Dodds K.G., Jowett T.W.D., Manley T.R., Anderson R.M., McEwan J.C. A high throughput single nucleotide polymorphism multiplex assay for parentage assignment in New Zealand sheep. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e93392 (doi: 10.1371/journal.pone.0093392).
13. Heaton M.P., Leymaster K.A., Kalbfleisch T.S., Kijas J.W., Clarke S.M., McEwan J., Maddox J.F., Basnayake V., Petrik D.T., Simpson B., Smith T.P.L., Chitko-McKown C.G., the International Sheep Genomics Consortium. SNPs for parentage testing and traceability in globally diverse breeds of sheep. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e94851 (doi: 10.1371/journal.pone.0094851).
14. Gill P. An assessment of the utility of single nucleotide polymorphisms (SNPs) for forensic purposes. *Int. J. Legal Med.*, 2001, 114: 204-210 (doi: 10.1007/s004149900117).

15. Li L., Li C.-T., Li R.-Y., Liu Y., Lin Y. SNP genotyping by multiplex amplification and microarrays assay for forensic application. *Forensic Sci. Int.*, 2006, 162: 74-79 (doi: 10.1016/j.forsciint.2006.06.010).
16. Rohrer G.A., Freking B.A., Nonneman D. Single nucleotide polymorphisms for pig identification and parentage exclusion. *Anim. Genet.*, 2007, 38(3): 253-258 (doi: 10.1111/j.1365-2052.2007.01593.x).
17. Heaton M.P., Harhay G.P., Bennett G.L., Stone R.T., Grosse W.M., Casas E., Keele J.W., Smith T.P.L., Chitko-McKown C.G., Laegreid W.W. Selection and use of SNP markers for animal identification and paternity analysis in U.S. beef cattle. *Mammalian Genome*, 2002, 13: 272-281 (doi: 10.1007/s00335-001-2146-3).
18. Fisher P.J., Malthus B., Walker M.C., Corbett G., Spelman R.J. The number of single nucleotide polymorphisms and on-farm data required for whole-herd parentage testing in dairy cattle herds. *J. Dairy Sci.*, 2009, 92: 369-374 (doi: 10.3168/jds.2008-1086).
19. Dodds K.G. The number of markers required for parentage assignment. *Proc. Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetic*. Melbourne, Victoria, Australia, 2003, 15: 39-42.
20. Jones A.G., Small C.M., Paczolt K.A., Ratterman N.L. A practical guide to methods of parentage analysis. *Molecular Ecology Resources*, 2010, 10: 6-30 (doi: 10.1111/j.1755-0998.2009.02778.x).
21. Jones A.G., Ardren W.R. Methods of parentage analysis in natural populations. *Mol. Ecol.*, 2003, 12: 2511-2523 (doi: 10.1046/j.1365-294x.2003.01928.x).
22. Chakraborty R., Stivers D.N. Paternity exclusion by DNA markers: effects of paternal mutations. *J. Forensic Sci.*, 1996, 41: 671-677 (doi: 10.1520/JFS13976J).
23. Kijas J.W., Lenstra J.A., Hayes B., Boitard S., Porto Neto L.R., San Cristobal M., Servin B., McCulloch R., Whan V., Gietzen K., Paiva S., Barendse W., Ciani E., Raadsma H., McEwan J., Dalrymple B. Genome wide analysis of the world's sheep breeds reveals high levels of historic mixture and strong recent selection. *PLoS ONE*, 2012, 10: e1001258 (doi: 10.1371/journal.pone.0094851).
24. Consortium ISG (2013) ISGC SNP Loci for Parentage Assignment (http://www.sheephapmap.org/news/parentage_page.php, http://sheephapmap.org/news/89_CorePanel.pdf).
25. Bell A., Henshall J., Gill S., Gore K., Kijas J. Success rates of commercial SNP based parentage assignment in sheep. *Proc. 20th Biennial Conference of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics 2013* /N.L. Villalobos (ed.). Napier, New Zealand, 2013: 278-282.
26. ISAG (2012) (<http://www.isag.us/Docs/AppGenSheepGoat2012.pdf>).
27. Kijas J.W., McEwan J., Clarke S., Henry H., Maddox J., McCulloch R., Driver F., Ilic K., Heaton M. Development of a SNP Panel for Parentage Assignment in Sheep. *International Sheep Genomics Consortium*, 2012 (http://sheephapmap.org/news/PAG_2012_ParentagePoster.pdf).
28. Weir B.S., Cockerham C.C. Estimating F-statistics for the analysis of population structure. *Evolution*, 1984, 38: 1358-1370.
29. Purcell S., Neale B., Todd-Brown K., Thomas L., Ferreira M.A.R., Bender D., Maller J., Sklar P., de Bakker P.I.W., Daly M.J., Sham P.C. PLINK: a tool set for whole-genome association and population-based linkage analyses. *Am. J. Hum. Genet.*, 2007, 81: 559-575 (doi: 10.1086/519795).
30. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2009. R Foundation for statistical computing. Vienna, Austria, 2005 (ISBN 3-900051-07-0) (<http://www.Rproject.org>).
31. Waits L.P., Luikart G., Taberlet P. Estimating the probability of identity among genotypes in natural populations: cautions and guidelines. *Mol. Ecol.*, 2001, 10: 249-256 (doi: 10.1046/j.1365-294X.2001.01185.x).
32. Jamieson A. The effectiveness of using co-dominant polymorphic allelic series for (1) checking pedigrees and (2) distinguishing full-sib pair members (in *Festschrift in Honour of Dr Clyde J. Stormont*). *Anim. Genet.*, 1994, 25(Suppl. 1): 37-44.
33. Jamieson A., Taylor S.C.S. Comparisons of three probability formulae for parentage exclusion. *Anim. Genet.*, 1997, 28: 397-400 (doi: 10.1111/j.1365-2052.1997.00186.x).
34. Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. *Population genetic software for teaching and research — an update*. *Bioinformatics*, 2012, 28: 2537-2539 (doi: 10.1093/bioinformatics/bts460).
35. Varuch E., Weller J.I. Estimation of the number of SNP genetic markers required for parentage verification. *Anim. Genet.*, 2008, 39: 474-479 (doi: 10.1111/j.1365-2052.2008.01754.x).

¹ФГБНУ Всероссийский НИИ животноводства

им. академика Л.К. Эрнста,

142132 Россия, Московская обл., Подольский р-н, пос. Дубровицы,

Поступила в редакцию

20 сентября 2015 года

e-mail: tandeniss@rambler.ru;

²ФГБНУ Якутский НИИ сельского хозяйства,

677001 Россия, Республика Саха, г. Якутск,

ул. Бестужева-Марлинского, 23/1;

³Institut für Tierzucht und Genetik,

University of Veterinary Medicine (VMU),

Veterinärplatz, A-1210, Vienna, Austria,

e-mail: gottfried.brem@agrobiogen.de

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2015, V. 50, № 6, pp. 746–755

VALIDATION OF THE SNP PANEL FOR PARENTAGE ASSIGNMENT IN LOCAL RUSSIAN SHEEP BREEDS

T.E. Deniskova¹, A.V. Dotsev¹, E.A. Gladyr¹, A.A. Sermyagin¹, V.A. Bagirov¹,
U.V. Hompodoeva^{1, 2}, A.N. Il'in^{1, 2}, G. Brem^{1, 3}, N.A. Zinovieva¹

¹L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Husbandry, Federal Agency of Scientific Organizations, pos. Dubrovitsy, Podolsk Region, Moscow Province, 142132 Russia, e-mail tandeniss@rambler.ru;

²Yakutsk Research Institute of Agriculture, Federal Agency of Scientific Organizations, 23/1, ul. Bestuzheva-Marlynskogo, Yakutsk, Sakha Republic, 677001 Russia;

³Institut für Tierzucht und Genetik, VMU (University of Veterinary Medicine), Veterinärplatz, A-1210, Vienna, Austria, e-mail gottfried.brem@agrobiogen.de

Acknowledgements:

The equipment of Bioresources and Bioengineering Center of L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Husbandry was used.

Supported by the Russian Science Foundation, project № 14-36-00039

Received September 20, 2015

doi: 10.15389/agrobiology.2015.6.746eng

Abstract

Creating panels for parentage assignment based on the most informative SNPs (minor allele frequency, $MAF \geq 0.3$) is an important problem of the modern sheep breeding. International Society of Animal Genetics (ISAG) recommends the parentage panel consisting of 88 autosomal SNPs, developed by the International Sheep Genomics Consortium. However, selection of SNPs, which were included into the panel, was performed on the base of DNA profiles of North American, Australian and New Zealand sheep. There were no Russian breeds in these researches, and the possibility of applying ISAG panel to parentage testing of these sheep must be studied. We have performed the whole genome SNP study in four local Russian sheep breeds — Romanov (ROM, $n = 22$), Baikal's fine-fleeced (ZBL, $n = 7$), Buryat sheep Buubey (BUB, $n = 15$), and Tuvan short fat tailed (TUV, $n = 16$) using Ovine SNP50k BeadChip. Data were processed for the total number of markers (54241 SNPs) and for 88 autosomal SNPs, recommended by ISAG. We estimated percentage of markers with $MAF \geq 0.3$, mean MAF value, probability of identity (PI) and probabilities exclusion (P_1 , P_2 , P_3) to evaluate the power of parentage panel for each of single breed and for entire sample. The universality of the panel was evaluated by comparing the degree of genetic differentiation of breeds based on the study of the entire number of SNPs and panel ISAG. For this purpose, we took in account such criteria as pairwise values of F_{st} (AMOVA) and results of principal component analysis (PCA-plot). We did summary statistics in Plink 1.09 and GenAIX 6.5. After the quality control of the entire sample, we selected 47385 SNPs with mean MAF of 0.292 ± 0.131 for the further analysis. The mean MAF for 88 parentage SNPs was 0.380 ± 0.091 . Analysis of the SNPs' distribution depending on theirs MAF showed that most of the SNPs (81.8 %) were informative ($MAF \geq 0.3$). Proportion of informative SNPs differed between breeds and was 56.8 % in ROM, 63.4 % in ZBL, 71.6 % in BUB and 72.7 % in TUV. Twenty-one SNPs (23.9 %) were highly informative in all four breeds, while 37 SNPs (42.0 %), 17 SNPs (19.3 %) and 10 SNPs (11.4 %) were informative, respectively, in three, two or only one breed. Marker DU196132_525.1 was monomorphic in TUV ($MAF = 0$). Three SNPs with $MAF < 0.3$ (DU232924_365.1, DU501115_497.1 and DU372582_268.1) were not informative for all four breeds. Lower pairwise values of F_{st} based on 88 SNPs with the same character of genetic relations compared with those using whole genome SNP profiles shown high flexibility of ISAG panel. PCA confirmed the low breed's dependence of SNP panel by creating purely consolidated overlapping areas corresponding to different breeds. The probability of identity for 88 SNPs ranged from 4.32×10^{-33} in TUV to 7.48×10^{-33} in BUB. Probability of exclusion was P_1 99.99 % for all four breeds. The value of P_2 was the highest in TUV (P_2 99.99 %) with P_2 99.98 % for others. The value of P_3 was 99.9 % for all breeds. Instead of some breed-dependent character of DNA profiles of 88 autosomal SNPs, our results confirmed the possibility of applying of ISAG panel for parentage testing in four local Russian sheep breeds.

Keywords: SNP genotyping, local sheep's breeds, MAF, ISAG panel, parentage assignment in sheep.